

Aus dem Botanischen Institut II
der Justus Liebig-Universität Giessen
Direktorin: Professor Dr. Lore Steubing

Ökophysiologische Untersuchungen über die
SO₂-, HCl- und HF-Empfindlichkeit
verschiedener Flechtenarten

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
im Fachbereich „Angewandte Biologie“
der Justus Liebig-Universität Giessen

vorgelegt von
Gholamreza Arzani
aus Teheran/Iran

Gießen 1974



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546402_0022

Aus dem Botanischen Institut II
der Justus Liebig-Universität Giessen
Direktorin: Professor Dr. Lore Steubing

Ökophysiologische Untersuchungen über die
SO₂-, HCl- und HF-Empfindlichkeit
verschiedener Flechtenarten

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
im Fachbereich „Angewandte Biologie“
der Justus Liebig-Universität Giessen

vorgelegt von
Gholamreza Arzani
aus Teheran/Iran

Gießen 1974



Dekan: Prof. Dr. W. Schuster
1. Berichterstatter: Prof. Dr. Lore Steubing
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. h. c. E. v. Boguslawski

Tag der mündlichen Prüfung: 2. Mai 1974

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
2 Literaturübersicht	4
2.1 Die Photosynthese von Flechten und ihre Beeinflussung durch Außenfaktoren	4
2.2 Die Respiration von Flechten und ihre Beeinflussung durch Außenfaktoren	8
2.3 Der Chlorophyllgehalt von Flechten und dessen Beeinflussung durch Außenfaktoren	10
2.4 Übersicht über Schadgaswirkungen auf Flechten	10
2.4.1 Allgemeine Schädigungsnachweise	10
2.4.2 Wirkungen von SO ₂	13
2.4.3 Wirkungen von HCl	18
2.4.4 Wirkungen von HF	20
3 Herkunft und Versuchsvorbereitung der verschiedenen Flechtenarten	24
4 Versuchsmethodik	27
4.1 Gaswechsellmessungen	27
4.2 Chlorophyllbestimmung	30
4.3 Schwefelbestimmung	30
4.4 Fluoridbestimmung	31
4.5 Anatomische Untersuchung	32
4.6 Begasung mit SO ₂	33
4.7 Begasung mit HCl	35
4.8 Expositionsversuch zur Ermittlung von HF-Wirkungen	37
5 Versuchsergebnisse	39
5.1 Begasung mit SO ₂	39
5.1.1 CO ₂ -Gaswechsel	39
5.1.2 Chlorophyllgehalt	61
5.1.3 Schwefelgehalt	69
5.2 Begasung mit HCl	71
5.2.1 CO ₂ -Gaswechsel	71
5.2.2 Chlorophyllgehalt	76
5.2.3 Untersuchung der Regenerationsfähigkeit der Flechten nach HCl-Begasung	79

	Seite
5.3 Expositionsversuch zur Ermittlung von HF-Wirkungen	84
5.3.1 Gaswechsellmessungen	84
5.3.2 Chlorophyllgehalt	98
5.3.3 Fluoridgehalt	101
6 Diskussion	105
7 Zusammenfassung	121
Literaturübersicht	124

1 Einleitung

Die gesamte Biosphäre ist heute direkt oder indirekt von den Auswirkungen unseres technischen Zeitalters betroffen. Selbst in den fernsten, vom Menschen unbewohnten Gegenden finden sich Verunreinigungen (wie z.B. das Blei im Polareis), die auf menschliche Tätigkeit zurückgehen. So sind auch die drei Trägermedien der Organismen, Boden, Wasser und Luft einer steigenden Belastung mit den verschiedenartigsten Verschmutzungsstoffen ausgesetzt.

Nun besitzen allerdings die Ökosysteme, die in ihrer Gesamtheit die Biosphäre (vielfach jetzt auch "Technosphäre" genannt) bilden, die Fähigkeit zu einer gewissen Selbstregulation. Verantwortlich hierfür sind vor allem die Biozönosen. Das mengenmäßige Verhältnis der einzelnen Glieder einer Biozönose läßt sich als Ergebnis einer langen, gemeinsamen Evolution auffassen (SCHWABE 1970) und unterliegt einem dynamischen Gleichgewicht. Das Zusammenspiel der verschiedenen Kompartimente eines Ökosystems ist räumlich und zeitlich so komplex, daß bis heute noch keines vollständig beschrieben und in seinen Funktionen erfaßt wurde (ELLENBERG 1972).

Alle Lebewesen stimmen aber darin überein, daß sie aufgrund ihrer Irritabilität auf äußere Reize reagieren. Solche Reize können z.B. von bestimmten Schadgasen ausgehen, die wirksame Bestandteile der Luftverunreinigungen bilden. So können Immissionen zu meßbaren Reaktionen sensibler Organismen führen.

Der eingetretene Reizerfolg vermag daher eine Reihe von tierischen und pflanzlichen Organismen als Indikatoren für Luftverunreinigungen geeignet erscheinen lassen. Das biologische Verhalten stellt jedoch keine unabänderliche Kausalität im Sinne der klassischen Physik dar, sondern unterliegt statistischen Gesetzmäßigkeiten. Organismen sind daher nicht mit physikalischen Meßgeräten vergleichbar, da biologische Meßverfahren auf Veränderungen an Lebewesen angewiesen sind, die mit statistischer Wahrscheinlichkeit durch verschiedene Belastungen hervorgerufen werden (SCHÖNBECK 1970).

Verschiedene Arten eines Ökosystems reagieren bei gleicher Belastung unterschiedlich. Aufgrund der voneinander abweichenden Sensibilität der Lebewesen eines Ökosystems kann es z.B. bei Immissionseinwirkung dazu kommen, daß bestimmte tierische und pflanzliche Indikatororganismen vermehrt, andere dagegen vermindert auftreten und eine weitere Gruppe sich bei dem gegebenen Schadstoffangebot indifferent verhält (STEUBING 1973).

Damit eröffnet sich aber auch die Möglichkeit, Organismen nicht nur zum Nachweis integrierter Schadstoffwirkungen zu verwenden, worauf sich schließlich ein biologisches Überwachungssystem aufbauen ließe.

In zahlreichen Arbeiten ist bereits gezeigt worden, daß niedere Pflanzen, insbesondere Flechten, besonders empfindlich auf Luftverunreinigungen reagieren, so daß sie vom Gesetzgeber für die Festlegung von Immissionsgrenzwerten

herangezogen werden. Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, die Wirkung der Schadgase SO_2 , HCl und HF , die über-regionale Bedeutung haben, auf verschiedene Flechtenarten zu prüfen und zu quantifizieren. Als Wirkungskriterien wurden vor allem der Gasstoffwechsel und der Pigmentgehalt benutzt. Außerdem fanden Bestimmungen über eine Anreicherung von Schwefel und Fluorid in den Testflechten statt.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen eines Forschungsauftrages des Bundesministeriums des Inneren und mit dessen finanzieller Unterstützung durchgeführt.

2 Literaturübersicht

Im folgenden soll ein kurzer Literaturüberblick über allgemeine Nachweismöglichkeiten einer Immissionseinwirkung auf Flechten gegeben werden. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Experimente konzentrierten sich auf die später zu beschreibenden Begasungsversuche mit SO_2 , HCl und HF . Deshalb soll auf die Bedeutung dieser Schadgase besonders eingegangen werden.

Da als Wirkungskriterien für Begasungseffekte vor allem Photosynthese, Respiration und Chlorophyllgehalt benutzt wurden, war es zwecks Deutung der eigenen Versuchsergebnisse notwendig, auch die wichtigsten Literaturangaben über die Beeinflussung der Kohlenstoffassimilation, Respiration und des Pigmentgehaltes durch Außenfaktoren hier zusammenzustellen.

2.1 Die Photosynthese von Flechten und ihre Beeinflussung durch Außenfaktoren

Flechten zeigen bei gleicher Bezugsgröße geringere Photosyntheseraten als die Blätter höherer Pflanzen. STOCKER (1927), STÄLFELT (1939) und RIED (1960) führen Durchschnittswerte für die CO_2 -Assimilation von Flechten auf, die bei $0,2 - 3,2 \text{ mg CO}_2 \text{ pro } 50 \text{ cm}^2 \text{ pro Stunde}$ liegen. WILHELMSSEN (1959) erklärt die niedrigen Photosyntheseraten der Flechten mit ihrem - gegenüber Blättern höherer Pflanzen - geringeren Chlorophyllgehalt.

Über die Abhängigkeit der Photosynthese vpm Wassergehalt

der Flechten wurde bereits von JUMELLE (1892 zit. bei SMITH 1962) berichtet. In Austrocknungsversuchen konnte er nachweisen, daß die Kohlenstoffassimilation der Flechten nicht bei Wassersättigung optimal ist, sondern die höchsten Photosyntheseraten erst bei etwa 75 % WK erreicht werden. Eine Austrocknung unter 70 - 75 % WK führt zu einer Depression der Photosynthese. An lufttrockenen Flechten konnte JUMELLE schließlich überhaupt keinen Gaswechsel mehr nachweisen.

Diese durch eine Optimumskurve zu charakterisierende Beziehung zwischen Photosynthese und Wassergehalt des Thallus konnte von zahlreichen anderen Autoren bestätigt werden (STOCKER 1927, STÄLFELT 1939, BUTIN 1954, VILLWOCK 1959, RIED 1960, KERSHAW 1972). Der Wassergehalt, der zu den höchsten Raten der Kohlenstoffassimilation führte, lag meist etwas niedriger als derjenige, der eine maximale Respiration verursachte (RIED 1960).

RIED fand außerdem, daß der für eine optimale Photosynthese verantwortliche Wassergehalt vom anatomischen Bau der Thalli abhängig ist. Je dicker der Thallus, desto niedriger ist der optimale Wassergehalt für die CO_2 -Assimilation. Die Abnahme der Photosynthese bei überoptimalen Wassergehalten wird auf die verminderte Gasdiffusion durch die Flechtenrinde durch Aufquellung der Thalli zurückgeführt (STOCKER 1927).

Bei Wiederanfeuchtung ausgetrockneter Flechten, die kaum noch einen CO_2 -Gaswechsel zeigten, stieg die Photosynthese-

rate langsam an und erreichte nach einer Tage bis Wochen dauernden Erholungsphase die Werte der feuchtgehaltenen Kontrolle (LANGE 1953, RIED 1953, 1960).

Eine Reaktivierung der photosynthetischen Leistung ausgetrockneter Flechten kann bereits bei Befeuchtung durch Tau und sogar durch Wasserdampfaufnahme erfolgen (LANGE und BERTSCH 1965, BERTSCH 1966, LANGE, SCHULZE, KOCH 1968, 1970, 1970 b, BÜTTNER 1971).

Die Fähigkeit der Flechten, selbst bei nicht wasserdampfgesättigter Luft von 80–85 % rel. Feuchte positive Stoffbilanzen zu zeigen, spricht für die hohe Leistungsfähigkeit ihres photosynthetischen Apparates (LANGE 1969). Diese befähigt sie zur produktiven Nutzung auch kurzfristiger Perioden mit hoher Luftfeuchte (BÜTTNER 1971).

STOCKER (1927) fand in Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit der Photosynthese der Flechten eine zweigipfelige Kurve. Mit zunehmender Temperatur stieg die CO_2 -Assimilationsrate bis zu einem Maximum bei $10\text{--}12^\circ\text{C}$ an, fiel danach bis zu einem Minimum bei 20°C ab und erreichte schließlich bei 25°C ein neues Maximum.

SMYTH (1934), STALFELT (1939), BLISS und HADLEY (1964), LANGE (1965 a) und BÜTTNER (1971) beobachteten im Gegensatz dazu eine gleichmäßige Steigerung der Photosynthese bei ansteigenden Temperaturen bis zu einem Optimalwert. VILLWOCK (1959) fand bei optimal eingequollenen Thalli von *H. physodes* zweigipfelige, bei maximal eingequollenen Flech-

ten eingipfelige Kurven für die CO_2 -Assimilation bei steigender Temperatur.

Die Lage des Optimalwertes der Photosynthese läßt Beziehungen zum Standort der Flechten erkennen. Bei Flechten aus Gebirgslagen liegt das Optimum bei Thallustemperaturen um 10°C und darunter, Flechten von tropischen Standorten erreichen das Optimum erst bei Temperaturen über 20°C (LANGE 1965).

Flechten zeigen gegenüber tiefen Temperaturen eine erstaunliche Kälteresistenz. Selbst eine mehrtägige Abkühlung auf -75°C konnte ohne Verlust der Vitalität überstanden werden (LANGE 1962). Darüberhinaus weisen Flechten bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt noch eine positive Stoffbilanz auf (LANGE 1962, BLISS und HADLEY 1964, LANGE 1965 a, LANGE und METZNER 1965, SCHULZE und LANGE 1968). Untersuchungen an einer *Cladonia*-Art ergaben, daß die Flechten auch nach längeren Frostperioden bei Wiedererwärmung nach kurzer Zeit wieder photosynthetisch voll leistungsfähig waren (LANGE 1966).

Im Gegensatz dazu sind voll eingequollene Flechten gegenüber einer Behandlung mit Temperaturen von $36-45^\circ \text{C}$ sehr empfindlich. Die CO_2 -Aufnahme kam bei dieser Behandlung völlig zum Erliegen und zeigte erst im Laufe von Tagen oder Wochen bei Aufenthalt bei niedrigen Temperaturen einen erneuten Anstieg (LANGE 1965 b).

Zwischen CO_2 -Assimilation der Flechten und Lichtstärke besteht die gleiche und regelmäßige Beziehung, die bei

anderen Pflanzen festgestellt worden ist (STOCKER 1927, STÄLFELT 1939, BUTIN 1954, VILLWOCK 1959, BÜTTNER 1971).

Für die photosynthetische Leistungsfähigkeit der Flechten scheint eine Abhängigkeit vom Chlorophyllgehalt gegeben zu sein (BÜTTNER 1971).

2.2 Die Respiration von Flechten und ihre Beeinflussung durch Außenfaktoren

Über die Atmungsintensität der Flechten liegen zahlreiche Untersuchungen vor, die von QUISPÉL (1960) zusammengestellt wurden. Eine Übersicht der Ergebnisse von mehreren Autoren zeigt, daß die Respirationsraten der Flechten mit 0,025 - 0,77 ml CO₂/g Trockengewicht und Stunde größenordnungsmäßig mit der Atmung von Geweben höherer Pflanzen übereinstimmen. Ein Vergleich der für verschiedene Flechtenarten gefundenen Atmungswerte erscheint jedoch unangebracht, da die Untersuchungsmethoden und -bedingungen zu different waren.

Die Abhängigkeit der Respirationshöhe der Flechten vom Wassergehalt des Thallus wurde bereits von JUMELLE (1892 zit. bei QUISPÉL 1960) beschrieben. Seine Feststellung, daß die Atmungsintensität der Flechten mit zunehmendem Wassergehalt des Thallus bis zu einem Maximum ansteigt, wurde von anderen Autoren bestätigt (STOCKER 1927, RIED 1960, STÄLFELT 1960, LANGE 1965).

Dagegen konnten JUMELLES und VILLWOCKS Beobachtungen eines Absinkens der Atmung bei überoptimalem Wassergehalt in neueren Untersuchungen nicht gefunden werden (RIED 1960, STÄLFELT 1960). Die Mehrzahl der terrestrischen Flechten erreicht

das Maximum der Respiration bei Werten von 80-95 % des maximalen Wassergehaltes (RIED 1960).

Eine zunehmende Austrocknung der Flechtenthalli führt ähnlich wie bei der Photosynthese zu einem Abfall der Atmung der Flechten. Über lange Zeit lufttrocken gehaltene Thalli zeigen schließlich keine meßbare CO_2 -Abgabe mehr (VILLWOCK 1959, RIED 1960, QUISPTEL 1960, LANGE 1965, BERTSCH 1966). Werden Flechten nach längerer Austrocknung erneut mit Wasser angefeuchtet, so kann kurze Zeit danach ein starkes Ansteigen der Atmungstätigkeit beobachtet werden (LANGE 1953, RIED 1953, STALFELT 1960, RIED 1960, ENSGRABER 1954). Diese kann 15 Minuten nach der Wiederanfeuchtung das Fünffache gegenüber der dauernd feucht gehaltenen Kontrolle erreichen (SMITH und MOLESWORTH 1973). Die Atmungsintensität sinkt nur langsam auf die Werte der angefeuchteten Flechten ab. Es ergibt sich für die Flechten also nach Wiederanfeuchtung bei sehr hoher Atmungsrate und gleichzeitig nur langsam zunehmenden Werten der Assimilation zunächst eine Periode mit negativer C-Bilanz (SMITH und MOLESWORTH 1973). Die beschriebene Atmungssteigerung konnte nach Zusatz von NaN_3 und KCN fast völlig beseitigt werden (SMITH und MOLESWORTH 1973). Trocken gewachsene Thalli zeigten bei der Wiederanfeuchtung nach vorausgegangener Austrocknung eine geringere Atmungssteigerung als Flechten, die von feuchten Standorten stammten (RIED 1960 b).

Die Atmung lufttrockener Flechten, die keinen meßbaren CO_2 -Austausch mehr aufwiesen, konnte auch unter der Einwirkung von Tau (LANGE?SCHULZE KOCH 1970 a und b) und Wasser-

dampf (LANGE, SCHULZE, KOCH 1970, BÜTTNER 1971, BERTSCH 1966) reaktiviert werden.

Die Atmungsintensität der Flechten zeigte bei Temperaturanstieg eine regelmäßige Zunahme (SCHÜTT 1932, STÄLFELT 1939, BÜTTNER 1971). LANGE (1966) beobachtete eine relativ hohe Widerstandsfähigkeit ausgetrockneter Flechten gegenüber Hitzeeinwirkungen. Angefeuchtete Flechten besaßen im Gegensatz dazu eine wesentlich größere Empfindlichkeit gegenüber Erwärmung.

2.3 Der Chlorophyllgehalt der Flechten und dessen Beeinflussung durch Außenfaktoren

WILHELMSSEN (1959) untersuchte den Chlorophyllgehalt der Flechten *Peltigra canina* (L), *Hypogymnia physodes* (L) ACH und *Xanthoria parietina* (L) BELTR. Er fand bei den drei Flechtenarten Chlorophyllgehalte, die etwa $1/4 - 1/10$ des Chlorophyllgehaltes von Blättern höherer Pflanzen betragen. Der Chlorophyllgehalt der Flechtenthalli war im Sommer geringer als im Winter.

VERSEGHY (1972) analysierte die saisonale Veränderung des Chlorophyllgehaltes von vier xerothermen Flechten. Bei *Parmelia pokornyi* wies der Chlorophyllgehalt sowohl ein Sommer- als auch ein Winterminimum auf. *Cladonia magyrica*, *C. furcata* und *C. convoluta* zeigten dagegen im Winter die höchsten Chlorophyllgehalte.

2.4 Übersicht über Schadgaswirkungen auf Flechten

2.4.1 Allgemeine Schädigungsnachweise

Neben der Beobachtung auf Veränderungen der natürlichen

Vegetation wie z.B. Eliminierung oder Förderung von Arten, Beeinträchtigung der Produktion oder Wuchsform werden Luftverunreinigungen im Pflanzentest auch nach dem Expositionsverfahren sowie durch chemische Analysen und ökophysiologische Untersuchungen nachgewiesen. Zur qualitativen und quantitativen Bestimmung vieler Immissionskomponenten gibt es zwar chemisch-physikalische Meßmethoden, jedoch läßt sich die Wirkung der Schadstoffe, vor allem auch die Kombinationswirkung, nur am biologischen Objekt selbst feststellen (SCHÖNBECK, van HAUT 1970).

Neben höheren Pflanzen eignen sich zum Nachweis von Luftverunreinigungen auch niedere wie Bakterien, Moose, Pilze und besonders die Flechten. Letztere werden neuerdings immer mehr als Immissionsindikatoren eingesetzt. Sie reagieren empfindlich auf Schadgase wie SO_2 , HCl , HF , NO_x und auf Stäube.

Eine Vielzahl von Städten wurde auf ihren natürlichen Flechtenbewuchs hin kartiert (Zusammenstellung bei KIRSCHBAUM, KLEE, STEUBING 1971). Nach den Kartierungsergebnissen findet sich in den Städten eine Flechtenzonierung, die meist eine gute Übereinstimmung mit den chemisch-physikalischen Daten der Immissionsbelastung aufweist (SERNANDER 1926, zit. bei LE BLANC und RAO 1973', BESCHEL 1958, LE BLANC 1961, BORTENSCHLÄGER 1969, KIRSCHBAUM 1971, LE BLANC und RAO 1973).

Außerdem stellte sich bei diesen Flechtenkartierungen eine unterschiedliche Toleranz der verschiedenen Arten gegenüber

Luftverunreinigungen heraus. Daher ist es möglich, nicht nur allgemeine Aussagen über die Immissionsbelastung eines Gebietes durch die Flechtenbewertung zu machen, sondern auch detaillierte Hinweise auf den mittleren Konzentrationsbereich der vorhandenen Immissionen und deren chemischer Natur zu geben (KIRSCHBAUM 1973). Frequenzbestimmungen von sonst häufigen Flechtenarten in Immissionsgebieten führten zur Aufstellung von biologischen Skalen zur Beurteilung des Grades der Luftverunreinigung mit SO_2 (GILBERT 1970, HAWKSWORTH 1970).

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der Luftverunreinigung bietet das Arbeiten mit Flechtenexplantaten, bei dem durch Bonitierung der sichtbaren Schädigung von ausgestanzten Flechten auf Expositionstafeln bereits nach wenigen Monaten eine Bewertung der Immissionsbelastung gegeben werden kann (BRODO 1961, SCHÖNBECK 1968, 1969, KIRSCHBAUM, KLEE, STEUBING 1971).

LE BLANC und DE SLOOVER (1970) entwickelten mit der Bestimmung des $\text{IAP} = \sum_n^1 (a \cdot f) / 10$ eine Methode, um den Grad der Luftverunreinigung rechnerisch mit Hilfe von Kartierungsergebnissen zu erfassen.

Die bisher zitierten Nachweismethoden beschränkten sich auf das Feststellen von äußeren, d.h. sichtbaren Schädigungen, obwohl wesentlich früher Störungen von Reaktionsabläufen im Stoffwechsel der Flechten vorausgehen. Untersuchungen über die physiologischen Reaktionen der Flechten lassen demnach Einblicke in den Wirkungsmechanismus der

Luftverunreinigungen erwarten. Bei emittentenbezogenen Kartierungen im Gelände werden immer nur die Schädigungen von bestimmten Immissionstypen, nie aber von einzelnen Komponenten gefunden. Es bieten sich für die Untersuchung von einzelnen Komponenten Begasungsversuche im Laboratorium an, wo dann auch die ökophysiologische Reaktion der einzelnen Flechtenarten auf verschiedene Schadstoffe verfolgt werden kann. Solche Begasungsversuche sind bereits von mehreren Autoren durchgeführt worden (VILLWOCK 1959, FEARSON und SKYE 1965, RAO und LE BLANC 1966, COKER 1967, DÄSSLER und RANFT 1969, BÖRTITZ und RANFT 1972, SHOWMAN 1972), jedoch meist mit Konzentrationen, wie sie im Freiland nur in Extremfällen anzutreffen sind.

2.4.2 Wirkungen von SO_2

Flechten zeigen bei Einwirkung von SO_2 typische Aufhellungen gegenüber den in gesundem Zustand meist graugrünenen Thalli. Eine länger anhaltende Einwirkung dieses Schadgases führt schließlich zum Absterben der grauweißlich verfärbten Flechtenthalli.

Dem Auftreten von äußeren Schädigungsmerkmalen gehen Störungen von Reaktionsabläufen im Stoffwechsel der Flechten voraus (GUDERIAN und van HAUT 1970). Solche physiologischen Prozesse, die unter Einwirkung von SO_2 beeinflusst werden, sind z.B. die Photosynthese und die Respiration der Flechten.

Über den Einfluß von SO_2 auf die Photosynthese von Flechten liegen bisher nur wenige Untersuchungen vor. PEARSON und SKYE (1965) setzten Proben von *Parmelia sulcata* stei-

genden Konzentrationen von gasförmigem SO_2 aus und prüften die photosynthetische Leistung mit der Warburg-Technik. Bereits 1 Stunde nach dem Beginn der SO_2 -Begasung mit 100-100 000 ppm war ein Absinken der Nettoassimilation zu beobachten.

Spätere Versuche mit niedrigeren SO_2 -Konzentrationen (SHOWMAN 1972) zeigten bei intakten Flechtenthalli bereits bei 4 ppm SO_2 ein signifikantes Absinken der Photosyntheseraten. Isolierte Phycobionten wiesen erst bei 6 ppm eine verminderte Assimilation auf. Bei Behandlung der Flechten mit 138 ppm waren nach wenigen Minuten negative Werte für die Nettoassimilation zu beobachten.

Zu ähnlichen Ergebnissen, die die hohe Empfindlichkeit des Assimilationsapparates der Flechten zeigten, kamen DÄSSLER und RANFT (1969) sowie BÖRTITZ und RANFT (1972). Nach 45 minütiger Begasung mit 3 ppm SO_2 sank die Bruttoassimilation verschiedener Flechten signifikant ab und zeigte nach Beendigung der Begasung eine nur langsam einsetzende partielle Erholung (BÖRTITZ und RANFT 1972).

In Begasungsexperimenten fand VILLWOCK (1959) kein Absinken der Assimilation lufttrockener Flechten bei Behandlung mit $0,5 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$. Die gleiche Konzentration führte jedoch bei Flechten in gequollenem Zustand nach 11-12 stündiger Einwirkungszeit im Dunkeln zu einer um 30 % verminderten Assimilationsleistung. Im Licht begaste Flechten reagierten mit einer stärkeren Assimilationsdepression als die bei Dunkelheit behandelten. Steigende Konzentrationen an SO_2 waren mit einem erhöhten Absinken der photosynthetischen Leistung der Flechten verbunden. Eine Konzentration von

3,0 mg SO_2/m^3 wirkte nach 5 stündiger Begasungszeit letal. Steles erwiesen sich lufttrockene Flechten als weniger empfindlich als gequollene (VILLWOCK 1959).

Untersuchungen über den Einfluß steigender Sulfitkonzentrationen auf die Kohlenstoffassimilation von Flechten (HILL 1971, PUCKETT, NIEBOER, FLORA und RICHARDSON 1973) bestätigten die Ergebnisse, die mit gasförmigem SO_2 erzielt wurden. Mit steigenden Sulfitkonzentrationen kam es zu einer Verminderung des Einbaues von markiertem $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ in die Flechtenthalli. Der Abfall der photosynthetischen Leistung war bei Strauch- und Laubflechten stärker als bei Krustenflechten (HILL 1971). Artabhängige Empfindlichkeitsunterschiede fanden ebenfalls BÖRTITZ und RANFT (1972) sowie PUCKETT et al. (1973). Die schädigende Wirkung des SO_2 wurde durch niedrige pH-Werte verstärkt, durch Verminderung der Azidität dagegen abgeschwächt (PUCKETT et al. 1973).

Über die Wirkung von SO_2 auf die Atmung der Flechten liegen widersprüchliche Ergebnisse vor. KLEE (1969), BADDERLY, FERRY und FINEGAN (1971) (1972) sowie SHOWMAN (1972) fanden eine Abnahme der Atmungsintensität bei Einwirkung von SO_2 . In feuchtem Zustand war die Abnahme stärker als in trockenem. VILLWOCK (1959), SCHUBERT und FRITSCH (1965), DÄSSLER und RANFT (1969) fanden dagegen selbst bei deutlicher äußerer Schädigung der Flechten kaum eine Beeinträchtigung der Atmung.

Die Einwirkung von SO_2 auf den Chlorophyllgehalt von Flechten untersuchten RAO und LE BLANC (1965). Eine 24 stündige Begasung mit 5 ppm SO_2 führte bei den Chloroplasten der

Algenzellen zu einem Abbau des Chlorophylls und zum Entstehen brauner Flecken sowie zur Plasmolyse. Diese abnormen Erscheinungen an den Chloroplasten führen RAO und LE BLANC auf die Bildung von H_2SO_3 , von HSO_3^- und SO_4^{2-} Ionen bei Einwirkung von SO_2 auf den Flechtenthallus zurück. H_2SO_3 führt zur Ausbleichung der Farbstoffe, die hypertonische Außenlösung bewirkt eine Plasmolyse der Algenzellen. Die bei der Dissoziation von H_2SO_3 und HSO_3^- freiwerdenden H^+ Ionen ersetzen im Chlorophyll das Magnesiumatom und führen so zur Bildung von Phäophytin (RAO und LE BLANC 1965, COKER 1967). Auf diese Weise kommt es zum Absinken des Chlorophyllgehaltes und damit zu den oben beschriebenen Störungen der Assimilation der Flechten (KLEE 1969).

Bei niedrigem pH-Wert fällt das Reduktionspotential von Chlorophyll a bei gleichzeitig ansteigender Oxidationskraft von HSO_3^- . Die erhöhte Empfindlichkeit der Flechten gegenüber SO_2 bei niedrigem pH-Wert läßt sich mithin durch eine zunehmende Zerstörung von Chlorophyll erklären (FUCKETT et al. 1973).

Die chemische Pflanzenanalyse zum Nachweis von Schwefelanreicherungen in der Pflanze oder in bestimmten Organen dient zusammen mit chemisch-physikalischen Luftanalysen zur Ermittlung vegetationsgefährdender SO_2 -Gehalte in der Luft und zur Erkennung potentieller Schädigungsursachen (GUDERIAN und van HAUT 1970). Dabei ist zu beachten, daß die Höhe der S-Anreicherung nicht nur von der Konzentration und Einwirkungsdauer des SO_2 , sondern auch von der jeweiligen Stoffwechselaktivität sowie von inneren und äußeren Wachstumsfaktoren abhängt. Ob es zu Schädigungen kommt,

hängt nicht nur von der angereicherten S-Menge ab, sondern vor allem von der Höhe der Absorptionsgeschwindigkeit des SO_2 sowie der artspezifisch und umweltbedingten Pflanzenresistenz. Ist die aufgenommene Menge je Zeiteinheit gering, so vermag SO_2 sowohl oxidiert als auch reduziert zu werden, ohne daß es zu Schädwirkungen kommt. Der S-Gehalt der Pflanzen kann somit nur als Indikator für die Einwirkung von SO_2 benutzt werden, nicht aber für die biologische Wirkung selbst. Unbefriedigende Ergebnisse sind vorhanden, wenn die S-Analyse als Absolutmethode eingesetzt und S-Gehalte, die nach verschiedenen Analysenverfahren ermittelt wurden, verglichen werden.

In der Literatur gibt es nur wenige Angaben über den S-Gehalt von Flechten. GILBERT (1965) führte im Industriegebiet um Newcastle in Nordengland Flechtenkartierungen durch und bestimmte den Schwefelgehalt in Proben von *Parmelia saxatilis*, die in verschiedenen Abständen vom Emittenten wuchsen. 6 Kilometer von der Schadgasquelle betrug der S-Gehalt der Flechten 2870 ppm, bei 14 Kilometern Entfernung 695 ppm und bei 34 Kilometern Abstand vom Emittenten nur noch 225 ppm. Damit zeigt der S-Gehalt einen deutlichen Anstieg bei steigendem SO_2 -Gehalt der Luft.

RAO und LE BLANC (1965) bestimmten den Sulfatgehalt begaster Flechten nach Extraktion des Flechtenmaterials mit einem Aceton-Wassergemisch. Der Test auf SO_4^{2-} war in den Extrakten begaster Flechten positiv, bei der Kontrolle dagegen negativ.

KLEE (1969) fand bei der Begasung von *H. physodes* mit 8,5 $\text{mg SO}_2/\text{m}^3$ im Laborexperiment einen Anstieg des Gesamt-

schwefelgehaltes. Der Autor schließt aus den Ergebnissen der analytischen Trennung von organisch und anorganisch gebundenen Schwefel, daß das aufgenommene SO_2 zunächst ziemlich schnell zu Sulfat oxidiert wird. Ist die Flechte in einem beispielsweise durch häufige Befeuchtung erzielten ausreichend aktiven Stoffwechselzustand, so wird das Sulfat in kurzer Zeit in organische Verbindungen eingebaut.

2.4.3 Wirkungen von HCl

Neben SO_2 und Fluoridverbindungen ist in jüngster Zeit Chlorwasserstoff eine wesentliche Komponente der Luftverunreinigung geworden. Emittenten von Chlorgas und Chlorwasserstoff können einerseits chlorherstellende und chlorverwertende Betriebe wie beispielsweise Emaille- oder Porzellanfabriken, Düngemittelfabriken und Kunstwollefabriken sein. Diese Schadgase können aber auch bei der Röstung von Erzen oder bei der Chlorierung organischer Verbindungen entstehen. In jüngster Zeit wurde HCl auch in den Emissionen von brennenden Müllkippen und Müllverbrennungsanlagen nachgewiesen. Das Schadgas entsteht dort vorwiegend bei der Verbrennung von PVC.

Begasungsversuche zeigten bei einer 20 oder 35 Stunden dauernden Einwirkung von 0,3-0,4 ppm HCl , daß junge Karottenpflanzen stärkere Ertragsverluste aufwiesen als solche, die während der fortgeschrittenen Vegetationszeit behandelt wurden (HÜLSENBERG 1972). Das mit HCl begaste Möhrenkraut wies weißlich graue Blattspitzen und fahlgrüne Blätter auf. Die Begasung führte zu einem Anstieg des Gesamtchloridgehaltes des Möhrenkrautes bis 16-21 mg Cl/g TS auf (Kontrolle 13-14 mg Cl/g TS).

Auch bei Mops führte eine 53 stündige Begasung mit 0,1 ppm HCl zu einem Anstieg des Chloridgehaltes der Blattmasse. Über die Wirkung von HCl auf Flechten liegen bisher kaum Untersuchungen vor.

Kartierungen des natürlichen Flechtenbewuchses in der Nähe einer Müllkippe bei Aßlar, deren Emissionen hauptsächlich aus SO₂ und HCl bestanden, ergaben einen deutlichen Anstieg der Absterberate der Flechten mit Annäherung an die Müllkippe (BRETTSCHEIDER 1972). *Parmelia sulcata* zeigte die höchsten und *Hypogymnia physodes* die geringsten Absterberaten, während *Cetraria chlorophylla* eine mittlere Empfindlichkeit aufwies. Explantate der drei oben genannten Flechtenarten in der Nähe der Müllkippe zeigten die stärksten Schädigungen bei den am nächsten zum Müllplatz gelegenen Meßpunkten (STEBING 1973).

Um neben der Kombinationswirkung der verschiedenen in den Emissionen der Müllkippe vorhandenen Schadgase die Wirkung von HCl gesondert zu untersuchen, wurden von BRETTSCHEIDER (1972) auch einige Testversuche mit HCl-Begasung im Laboratorium durchgeführt. In 0,2 m³ fassenden Aquarien wurden *H. physodes*, *P. furfuracea*, *C. glauca* und *U. spec.* Konzentrationen von 0, 50, 100 und 200 ppm HCl ausgesetzt. Bonitierungen ergaben nach 12 tägiger Behandlungszeit bei *C. glauca* den geringsten und bei *H. physodes* den höchsten Schädigungswert. *P. furfuracea* lag in der Empfindlichkeit zwischen den beiden eben genannten Flechten. Gleichzeitig durchgeführte Chlorophyllgehaltsbestimmungen ergaben überraschenderweise genau entgegengesetzte Ergebnisse. Hier reagierte *C. glauca* mit dem stärksten, *H. physodes* dagegen

mit dem geringsten Abfall des Chlorophyllgehaltes nach vorangegangener HCl-Begasung.

2.4.4 Wirkungen von HF

Fluorverbindungen, die als Luftverunreinigungen wirksam werden können, sind gasförmiges HF und flüchtige Fluoride wie Na_3AlF_6 und SiF_4 . Sie können in den Emissionen der Aluminiumindustrie, von Ziegeleien, Töpfereien und Glashütten enthalten sein (LE BLANC, COMEAU und RAO 1971). Die schädliche Wirkung dieser Verbindungen wurde bereits am Ende des vorigen Jahrhunderts (von SCHMITZ-DUMANT 1896) beschrieben und in Versuchen nachgewiesen.

Schäden an höheren Pflanzen, die durch Fluoridimmissionen verursacht wurden, sind bereits 1945 in der Nähe einer schottischen Aluminiumschmelze beobachtet worden. Ganze Waldstriche, die in der Hauptwindrichtung zum Emittenten lagen, starben ab, und Schafe, die in dieser Region grasteten, zeigten typische Fluorschäden. Untersuchungen der Moos- und Flechtenvegetation auf Gestein, Bäumen, Pfosten von Gartenzäunen und auf dem Boden in diesem Gebiet zeigten, daß die Fluoridemissionen einen Rückgang des natürlichen Flechten- und Moosbewuchses verursachten.

Kartierungen des Flechtenbewuchses von Zaunpfählen ergaben um die oben erwähnte aluminiumverarbeitende Fabrik eine "Flechtenwüste", die ellipsoidisch ausgeformt die Hauptwindrichtung anzeigt. An diese Flechtenwüste, in deren Zentrum empfindliche Nadelbäume wie *Pinus silvestris* und *Pseudotsuga taxifolia* nicht zu wachsen vermögen, schließt sich eine "Übergangzone" an, in der verkümmerte Formen

verschiedener Flechtenarten vorkommen. Die Flechte, die von den 12 von GILBERT (1971) untersuchten Arten am unempfindlichsten gegenüber Fluorid war, war *Stereocaulon pileatum*. Fluoridbestimmungen im Flechtenmaterial zeigten ein starkes Ansteigen des Gehaltes an löslichem Fluorid in den Flechtenthalli, die in der Nähe der Fabrik gesammelt wurden.

Übersicht über den Gehalt an löslichem Fluorid von Flechten im Bereich einer Aluminiumschmelze (verändert nach GILBERT 1971): Entfernung der Standorte in der Hauptwindrichtung zum Werk angegeben in Meilen.

	1,0	1,9	6,5	7,5	Meilen
<i>Farmelia saxatilis</i>	47	17	14	0	ppm.

Außerhalb des Einflussesbereiches der Fabrik zeigten die Flechten einen nicht meßbaren Fluoridgehalt.

Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch NASH (1971), der Transplantate verschiedener Flechtenarten den Fluoridemissionen einer chemischen Fabrik in Pennsylvania aussetzte. Die Flechten zeigten in einer Entfernung von 100 m vom Emittenten starke Aufhellungen ihrer Thalli, die mit einem Abbau von Chlorophyll in Phäophytin verbunden war. Die Fluoridkonzentration dieser Flechten lag bei 100-220 ppm F/g TS. Der Fluoridgehalt der Kontrolle betrug demgegenüber nur 14-25 ppm. Eine 9 tägige Begasung von *P. caperata* mit einer Fluoridkonzentration von $4 \mu\text{g F/m}^3$ führte ebenfalls zu einem Anstieg des Fluoridgehaltes bis auf 84-115 ppm F/g TS.

COMEAU und LE BLANC (1972) konnten diese Ergebnisse in Begasungsversuchen mit *Hypogymnia physodes* bestätigen. Sie beobachteten bei einer 12 stündigen Einwirkung von

65 ppb F eine Änderung der Farbe der Flechtenthalli von graugrün zu gelb, rosa und braun. Der Rand der Thalli löste sich vom Substrat. Mit diesen makroskopischen Veränderungen war eine Plasmolyse der Algenzellen verbunden. Nach einer 12 stündigen Begasung mit 65 ppb F wies *H. physodes* sogar einen Fluoridgehalt von 194 ppm F/g TS auf. COMEAU und LE BLANC (1972) vermuten, daß der Grad der Schädigung eines Organismus durch HF weniger von der akkumulierten Menge an Fluorid in ihm als von dem F-Transport und der Ablagerung abhängt.

LE BLANC, RAO und COMEAU (1972) bestimmten an Hand von Kartierungen des Flechten- und Moosbewuchses von Bäumen an 42 Standorten, die rund um eine Aluminiumschmelze in Arvida lagen, die IAP-Werte in einer 250 km² großen Region. Die IAP-Indices, die bei Werten von 0-103 lagen, wurden in 6 Gruppen eingeteilt und die untersuchte Fläche in 6 Zonen unterschiedlicher Fluoridimmission untergliedert. Gleichzeitige Fluoridbestimmungen der Luft zeigten ein Ansteigen der F-Gehalte von 134 ppm F, die in der entferntesten IAP-Zone (IAP=103) gemessen wurden, auf 900 ppm F in der inneren Zone mit einem IAP von 1. Diese Werte beweisen, daß steigende Fluoridkonzentrationen mit fallenden IAP-Werten verbunden sind.

BÖRTITZ und RANFT (1972) stellten für einige Flechtenarten eine Rangfolge der Schädigung der Photosynthese nach 27 stündiger Einwirkung von 0,3-0,4 mg HF/m³ in Begasungsexperimenten auf. Danach sind *Cladonia gracilis* als sehr empfindlich, *Hypogymnia physodes* und *Cetraria islandica* als empfindlich und *Umbilicaria hirsuta* als weniger empfind-

lich anzusehen.

Unter Einwirkung von HF auf Flechten konnte ein Absinken ihres Chlorophyllgehaltes beobachtet werden (NASH 1971, LE BLANC, COMEAU und RAO 1971). Die zuletzt genannten Autoren fanden jedoch bisher kein Produkt des Chlorophyllabbaues, wie es bei der Reaktion mit SO_2 der Fall war. (Vergl. Seite 16). Ein Ersatz des Mg-Atoms im Chlorophyllmolekül durch H^+ konnte ebenfalls nicht nachgewiesen werden. Möglicherweise kommt es bei HF-Einwirkung auf Flechten zur Bildung von unlöslichem MgF_2 und damit ebenfalls zum Mg-Verlust des Chlorophyllmoleküls.

3 Herkunft und Versuchsvorbereitung der verschiedenen Flechtenarten

Auf Vorschlag des an der Ermittlung von Grenzwerten für Luftverunreinigungen beteiligten VDI wurden insgesamt 7 verschiedene Flechtenarten, die in der Bundesrepublik Deutschland eine größere Verbreitung haben, auf ihre Sensibilität gegenüber SO_2 , HCl und HF geprüft. Die Testflechten waren:

1. *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.

Syn. *Parmelia physodes* (L.) Ach.

Eine oberflächlich graugrünliche bis graubraune Blattflechte, deren Unterseite schwarz bis braun gefärbt ist. Der Thallus bildet verzweigte Rosetten, die dem Substrat eng anliegen und am Rand leicht ansteigen.

2. *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf.

Syn. *Parmelia furfuracea* (L.) Ach.

Eine oberflächlich grau bis graubräunliche, bandförmige Strauchflechte mit dunkler, gegen die Enden aufgehellter Unterseite. Die Flechte bildet einen rosettenförmigen, oft rasigen, bandförmigen und isidiösen Thallus.

3. *Parmelia caperata* (L.) Ach.

Die grünlichgelb bis strohgelb gefärbte Blattflechte bildet einen runzeligen Thallus mit körnigen Soredien.

4. *Parmelia saxatilis* (L.) Ach.

Der Thallus dieser oberflächlich grauen, an der Unterseite dunkel gefärbten Blattflechte ist rosettig und bildet lose anliegende Lappen ohne Sorale aber oft mit Isidien aus.

5. *Parmelia sulcata* Th. Tayl.

Diese Flechte ähnelt der vorher beschriebenen Art, hat aber mit weißen Soralen besetzte Runzelleisten.

6. *Platismatia glauca* (L.) Culb. et Culb.

Syn. *Cetraria glauca* (L.) Ach.

Eine oberflächlich bläulichgrüne bis silbergraue Blattflechte, deren Unterseite glatt und dunkel ist. Der häufig fast strauchförmige Thallus ist an den Rändern mit Soralen oder Isidien besetzt.

7. *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.

Der Thallus dieser oberflächlich orangegelben Blattflechte mit heller Unterseite ist rosettig und völlig soredienlos.

Zunächst mußten Standorte gefunden werden, die über ein für alle Versuche ausreichendes Flechtenvorkommen verfügten. Als geeignete Sammlungsorte erwiesen sich verschiedene Standorte im Südschwarzwald und am Kaiserstuhl. Für jede Versuchsserie wurde frisches Material von den unten genannten Wuchsorten gesammelt. Die Standorte selbst lagen weit außerhalb des Wirkungsbereiches von Städten, um nicht Gefahr zu laufen, schon geschädigtes bzw. vorbelastetes Ausgangsmaterial zu verwenden.

Sammelorte des Versuchsmaterials:

Flechtenart	Flechtenträger (spec.)	geographische Lage des Fundortes	Höhe über N.N.
<i>F.furfuracea</i>	<i>Sorbus aucuparia</i>	Umgebung Unter- münstertal	ca. 1000m
<i>P.caperata</i>	<i>Acer platano-</i> <i>ides</i>		
<i>P.sulcata</i>	"		
<i>H.physodes</i>	<i>Picea alba</i>		
<i>P.saxatilis</i>	<i>Picea alba</i> <i>Acer platano-</i> <i>ides</i>	Ibach bei Muggen- brunn	1063 1121
<i>C.glauca</i>	<i>Picea alba</i>	Ibach	1063
<i>X.parietina</i>	<i>Acer platano-</i> <i>ides</i>	westl.von Freiburg Bötzingen	ca. 200 m 250 m

Die Flechten wurden samt ihrer Rinden- bzw. Borkenunterlage mit Hilfe eines Messers vom Stamm gelöst und möglichst rasch zur Aufarbeitung ins Labor gebracht. Die Trennung der Flechtenthalli von der Rindenunterlage erfolgte nach kurzem Einweichen in destilliertem Wasser mit einer Pinzette.

Die feuchten Flechten wurden anschließend in einem dunklen Raum und etwa 60 % relativer Luftfeuchtigkeit getrocknet.

Bis zum Versuchsbeginn wurde das Flechtenmaterial in einer Gefriertruhe bei -15°C aufbewahrt. Photosynthese- und Atmungsmessungen zeigten, daß durch diese Behandlung keinerlei Schädigung der Flechten verursacht wurde.

Unmittelbar vor Beginn der Begasung und des Freilandversuches wurden Gaswechsel und Pigmentgehalt sowie S-Gehalt und Fluoridgehalt des Flechtenmaterials bestimmt.

4.1 Gaswechsellmessungen

Die Gaswechsellmessungen erfolgten mit Hilfe der Warburg-Manometrie (KLEINZELLER et al 1965, SCHOPFER 1970, URBACH et al 1972). Zur Verfügung stand eine Warburg-Apparatur Typ S "85" G der Firma Braun, Melsungen. Als Sperrflüssigkeit diente die Brodie'sche Lösung Typ TF II A-Th der gleichen Firma. Die kegelförmigen Reaktionsgefäße mit exzentrisch am Boden fixierten Einsatzgefäßen zur Aufnahme der Reaktionslösung hatten zusammen mit den aufgesetzten Manometern ein Gesamtvolumen von 20-23 ml. Als Lichtquelle für die Photosynthesemessung standen 2 Leuchtstoffröhren der Firma Philips (TLF 40 W/34 de luxe) zur Verfügung. Im Thermostatenbad wurde damit eine Lichtintensität von ca. 4500 Lux erzielt. Die Versuchstemperatur betrug 20° C.

Von dem begasten Material sowie der Kontrolle wurden jeweils drei Parallelen von je 100 mg lufttr. Substanz während des ganzen Versuchs gemessen. Außerdem wurden stets zwei Kontrollgefäße ohne Versuchsmaterial aber sonst gleiche m Ansatz als Thermobarometer mitgeführt. Das Flechtenmaterial wurde vor dem Einsetzen in die Reaktionsgefäße durch 5 minütiges Eintauchen in destilliertes Wasser angefeuchtet und mit Filterpapier leicht abgetupft.

Als Reaktionslösung diente eine Mischung von KHCO_3 und K_2CO_3 (15 ml 3 M KHCO_3 + 5 ml 3 M K_2CO_3 -Lösung), um einen konstanten CO_2 -Partialdruck in den Reaktionsgefäßen aufrechtzuerhalten. Die Aktivierung der Reaktion zur Einstellung des CO_2 -Gleichgewichtes erfolgte durch einen Zusatz von 10 mg Carboanhydrase (nach SCHOPFER 1970). In die Einsätze der

Reaktionsgefäße wurden jeweils 0,2 ml der oben beschriebenen Lösung pipettiert.

Nach dem Beschicken der Reaktionsgefäße mit dem eingequollenen und danach mit Filterpapier abgetupften Versuchsmaterial wurde das Reaktionssystem bei eingeschaltetem Licht und eingeschalteter Schüttelvorrichtung für etwa 1 Stunde zunächst ohne Messung offengelassen. Nach RIED (1960) verursacht nämlich das zur Entfernung des Wasserfilms nötige Abtrocknen der Flechten eine Atmungssteigerung. Dieser Effekt klingt spätestens nach 1 Stunde ab. Deshalb begannen die Messungen erst, wenn sich ein konstanter manometrischer Wert eingestellt hatte. Nach Verschuß des Systems wurde dann die O_2 -Entwicklung der Flechten alle 15 Minuten für eine Zeit von 90 Minuten am Manometer registriert. Anschließend wurde das Licht ausgeschaltet und nach 30 Minuten die Dunkelatmung des Versuchsmaterials bestimmt. Die Dauer der Messung betrug ebenfalls 90 Minuten.

Die Berechnung der bei der Photosynthese entwickelten bzw. bei der Atmung verbrauchten O_2 -Mengen erfolgte nach der Gleichung:

$$V = h \cdot K$$

Für h wird in der Formel folgender Wert eingesetzt:

$$h = h_1 + h_{Th}$$

h_1 ist die Druckabnahme bzw. Zunahme im Reaktionsgefäß, h_{Th} steht für die Druckänderung im mitgeführten Thermobarometer, um die der Wert h_1 vermindert oder erhöht werden muß.

Die Gefäßkonstante K wurde für jedes Reaktionsgefäß wie folgt berechnet:

$$K = \frac{(V_g - (V_{fl} + V_s) \cdot \frac{273}{273 + t} + \alpha_{O_2} \cdot V_{fl})}{p_o} \quad [mm^2]$$

V_g = Gesamtvolumen = Gefäßvolumen + Manometervolumen
 V_{fl} = Volumen der Gesamtflüssigkeit im Reaktionsgefäß
 V_s = Materialvolumen
 t = Versuchstemperatur
 k_{O_2} = Bunsenscher Absorptionskoeffizient für Sauerstoff
 bei 20° C = 0,039
 p_0 = Normaldruck der Sperrflüssigkeit

Die für die Berechnung der Gefäßkonstanten erforderliche Bestimmung des Flechtenvolumens erfolgte unter Ausnutzung des Archimedischen Prinzips. Dies beruht darauf, daß der Auftrieb eines in Wasser getauchten Körpers gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit ist. Zur Messung diente eine Transpirationswaage. An einem ihrer Wägebalken wurde das Flechtenmaterial in einem Gazebeutel durch Beschweren mit einem Gewichtsstein in Wasser getaucht. Mit Hilfe eines Gegengewichts am anderen Wägebalken wurde das Gleichgewicht eingestellt. Anschließend wurde das Flechtenmaterial aus dem Gazebeutel herausgenommen, der leere Beutel erneut beschwert und in das Wasser getaucht. Die Gleichgewichtseinstellung erfolgte wiederum mit Hilfe eines Gegengewichtes. Für die Berechnung des Flechtenvolumens diente folgende Gleichung:

$$V = f - (b + c - (d + e))$$

b = Gewicht der Flechten + Gazebeutel (in Wasser)
 c = Gegengewicht 1
 d = Gewicht des Gazebeutels ohne Flechten (in Wasser)
 e = Gegengewicht 2
 f = Gewicht der feuchten, abgetupften Flechten (in Luft)

Der beschriebene Vorgang wurde für jede Flechtenart an sieben Proben durchgeführt und ein Mittelwert berechnet. Die so erhaltenen Ergebnisse der Volumenbestimmung wurden für das Materialvolumen in die Gleichung zur Berechnung der Gefäßkonstanten eingesetzt.

4.2 Chlorophyllbestimmung

Die Chlorophyllbestimmung erfolgte nach der von KLEE (1969) ausgearbeiteten Methode zur quantitativen Bestimmung der Chloroplastenpigmente, die auf Arbeiten von HAGER und BER-TENRATH (1962, 1966) zurückgeht. Zur Analyse wurden 100 mg lufttrockenes, zerkleinertes Flechtenmaterial in einem Mörser unter Zusatz von Quarzsand und einem Gemisch aus 80 % Aceton und 20 % Wasser (STEUBING 1965) fein zerrieben. Dem Wasser sind 7,5 % Ammoniak zur Neutralisation der Flechtensäuren zugesetzt. Der Extrakt wurde durch eine Glasfilternutsche (Typ G 4) mittels einer Wasserstrahlpumpe abgesaugt, in den Mörser zurückgegeben, wiederholt wie oben beschrieben zermörsert und erneut abgesaugt, bis der Rückstand weißgrau aussah. Die vereinigten Acetonextrakte wurden in einem Meßkolben mit einem Aceton-Wassergemisch bis zur Marke aufgefüllt.

Die Messung der Extinktion der Lösung erfolgte mit Hilfe eines Spektralphotometers bei Wellenlängen von 663 nm (Chl. a), 645 nm (Chl. b) und 652 nm (Gesamtchl.). Der Chlorophyllgehalt errechnet sich nach den von STEUBING (1965) angegebenen Formeln.

4.3 Schwefelbestimmung

Zur Bestimmung des Schwefelgehaltes der Flechten diente die von JÄGER und STEUBING (1970) ausgearbeitete Methode, mit der eine Fraktionierung des Gesamtschwefels in organisch und anorganisch gebundenen Schwefel möglich ist. Zur Analyse wurde das fein zermahlene, bei 105° C getrocknete Flechtenmaterial in ein Porzellanschiffchen einge-

füllt und anschließend im Luftstrom in einem Quarzrohr verbrannt. Für die Untersuchung wurde die von der Firma Schott und Gen., Mainz hergestellte Verbrennungsapparatur in der Halbmikroausführung benutzt. Die Verbrennungsgase, in denen sich bei dieser Arbeitsweise der organisch gebundene Schwefel befindet, werden in einer Vorlage von 15 ml 3 %iger H_2O_2 -Lösung absorbiert. Die Absorptionsvorlage enthält nach diesem Vorgang den organisch gebundenen Schwefel als H_2SO_4 . Der anorganische Schwefel befindet sich im Verbrennungsrückstand, der zur Erfassung des Sulfat-S mit destilliertem Wasser aufgeköcht wird.

Die so erhaltenen Lösungen werden je nach Schwefelgehalt des Materials mit einer NaCl-Lösung versetzt und eingedampft. Die anschließende Sulfatbestimmung beruht auf dem Prinzip der Reaktion von Bariumchlorid mit dem Sulfation in methanolischer Lösung. Die jeweils durch Zugabe von eingestellter Bariumchlorid-NaCl-Lösung erhaltene BaSO_4 -Trübung wird durch Extinktionsmessungen mit einem lichtelektrischen Kolorimeter (Lange, Berlin) unter Vorschaltung eines Blaufilters (BG 12 von Schott und Gen., Mainz) erfaßt.

Die Angaben über die verwendeten Reagenzien und die Berechnung des Schwefelgehaltes finden sich bei JÄGER und STILBING (1970).

4.4 Fluoridbestimmung

Die Bestimmung von Fluorid im Flechtenmaterial wurde nach dem von REVSMANN und WESTPHALEN (1969) ausgearbeiteten elektrometrischen Verfahren durchgeführt. Dazu wurden 500 mg zerkleinerte lufttrockene Flechtenthalli in einem

Nickeltiegel 2 1/2 Stunden bei ca 500° C verascht und anschließend mit etwa 0,6 g (3 Plätzchen) NaOH über der Flamme eines Bunsenbrenners aufgeschlossen. Nach dem Erkalten der Proben wurden zu der Schmelze 2,5 ml dest. H₂O, 6,25 ml Zitronensäurelösung und 2,5 ml HCl hinzugefügt. Die Einstellung der Proben auf einen pH-Wert von 5,7 erfolgte mit Natronlauge. Nach dem Auffüllen der Lösung auf 25 ml wurde der F-Gehalt der Probe mit Hilfe einer fluoridspezifischen Elektrode der Firma Orion, Modell 96 -09 und einem digitalen pH-Meter der gleichen Firma bei 20° C gemessen. Weitere Details über die Versuchsmethodik sind der oben erwähnten Veröffentlichung zu entnehmen.

4.5 Anatomische Untersuchungen

Zur Untersuchung der Anatomie der Flechtenthalli wurden Querschnitte nach der Paraffin-Einbettungsmethode hergestellt. Dazu mußten die Flechten zunächst in einen voll wassergesättigten, nahezu luftfreien Zustand gebracht werden. Dies geschah, indem die Flechtenthalli in wassergefüllte Bechergläser getaucht und in einen Exsikkator gestellt wurde. Zum Entfernen der Luft aus den Thalli wurde der Exsikkator für 24 Stunden an eine Wasserstrahlpumpe angeschlossen. Eine Öffnung des Exsikkatorhahnes nach jeweils 1 Stunde diente der Erneuerung des Vakuums. Als sich nach 24 stündiger Behandlung keine Luftblasen mehr zeigten, konnte mit der Entwässerung des Flechtenmaterials begonnen werden. Diese ging in sechs Stufen vor sich, von denen jede einzelne 12 Stunden dauerte. Die Entwässerung mit tertiärem Butanol hat den Vorteil, daß die Objekte nicht hart werden und dabei auftretende Schrumpfungen und Risse

im Material vermieden werden können.

Entwässerung des Flechtenmaterials mit tertiärem Butanol (verändert nach GERLACH 1969):

Stufe	I	II	III	IV	V	VI
Wasser ml	50	30	15	-	-	-
Äthanol 92,5 ml	40	50	50	45	-	-
i-Prpanol ml	-	-	-	-	25	-
tert. Butanol ml	10	20	35	55	75	100

Die entwässerten Objekte wurden schließlich in aufgelöstes Paraffin eingebettet. Die Herstellung der Querschnitte mit einer Dicke von 10, 15 und 20 μ erfolgte mit einem Grundschliffenmikrotom der Firma Leitz, Typ 1300. Die Schnitte wurden nach der Pianese-Färbung (GERLACH 1969) angefärbt. Die Zusammensetzung der Farbstofflösung der Pianese-Lösung war folgende:

Lösung A	0,5 g Malachitgrün + 50 ml H ₂ O dest.
Lösung B	0,5 g Säurefuchsin + 100 ml " "
Lösung c	0,01 Martinsgelb + 1 ml " "

Auf die gefärbten Objekte wurde etwas Kunstharzlösung aufgetropft.

4.6 Begasung mit SO₂

Für die Begasung mit SO₂ wurde ein Pflanzenwuchsmeßschrank (Typ AB/JM-P-B) der Firma Karl Weiss, Gießen mit einem gasdichten Prüfraum von 300 l Inhalt benutzt. Von besonderem Vorteil für die Versuche erwies sich, daß die Einstellung der Luftfeuchtigkeit nach dem Taupunktprinzip stattfindet. Die Frischluft wird vor ihrem Eintritt in den Prüfraum durch ein elektrisch temperiertes Wasserbad geleitet und erreicht so eine Taupunkttemperatur, die der

Wasserbadtemperatur entspricht. Die Luft kann dadurch mit der gewünschten Feuchte angereichert werden, ohne daß sich im Prüfraum Kondensat bildet, in dem sich sonst SO_2 sofort lösen würde. Die Menge der ständig zugeführten Frischluft wurde über einen Luftmengenmesser auf ca $20 \text{ m}^3/\text{h}$ Luftdurchsatz eingestellt. Die relative Luftfeuchtigkeit betrug während der gesamten Versuchsdauer 75%.

Die Heizung bzw. Kühlung des Prüfraumes wurde durch Sole-Umlauf temperierung indirekt über die Prüfraumwände bewerkstelligt. Zur Beleuchtung diente eine wassergekühlte Xenon-Hochdrucklampe, die in einem belüfteten Raum über dem Prüfraum angebracht war. Die Absorption der Wärmestrahlung erfolgte durch Alkohol, der unterhalb der Lampe durch eine Flexiglasküvette floß. Durch die Lampe wurde in Höhe der Flechtenthalli eine Energie von ca. $0,31 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2} \times \text{Min}$ erzielt. Für den Begasungsversuch wurde ein 12 Stundentag gewählt. Die Temperatur betrug während der Versuchsdauer 20°C .

Das SO_2 wurde von einer SO_2 -Bombe entnommen, seine Dosierung erfolgte mit einer Telab-Pumpe. Das so dosierte Schadgas gelangte über einen Zuführungsstutzen in die klimatisierte Frischluft und damit in den Prüfraum. Die kontinuierliche Messung der SO_2 -Konzentration im Prüfraum ließ sich durch den Einsatz eines Ultragas 3 Gerätes der Firma Wörschhoff, Bochum bewerkstelligen. Die SO_2 -Konzentration betrug Tag und Nacht $0,9 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$.

Das Flechtenmaterial wurde in kleinen Beuteln aus Fliegen-gaze im Prüfraum aufgehängt. Jeden Morgen wurden die Flechten kurz aus dem Begasungsraum herausgenommen und mit einem

Wäschesprenger mit destilliertem Wasser eingesprüht. Die Versuchsdauer für die Begasung betrug insgesamt 28 Tage. Die Kontrollflechten wurden in einem zweiten Pflanzenwuchsmeßschrank des gleichen Typs unter den gleichen Bedingungen gehalten.

4.7 Begasung mit HCl

Um die Wirkung des Schadgases HCl auf die untersuchten Flechtenarten zu prüfen, wurde auf dem Versuchsfeld Hattersheim des Institutes für Wasser-, Boden- und Lufthygiene Berlin eine Chlorwasserstoffbegasung vorgenommen. Als Prüfraum dienten gasdichte Kleingewächshäuser mit einer Grundfläche von $2,5 \text{ m}^2$ und einem Volumen von ca. 4 m^3 , die an ein unterirdisch verlegtes Rohrsystem angeschlossen sind (HÜLSENBERG 1972). Die Kleingewächshäuser bestehen aus einem Holzgerüst, das an den Seiten mit Guttagen-Folie bespannt ist. Die Dachbedeckung bilden Acrylglasscheiben, die für UV-Strahlen durchlässig sind. Ein Ventilator drückte durch das Rohrsystem ein definiertes HCl-Luftgemisch in die Kleingewächshäuser, so daß hier ein 80-facher Luftwechsel /h vorlag. Die kontinuierliche Erfassung der HCl-Konzentration erfolgte mittels umgebauter Ultragas-3-Geräte der Firma Wösthoff, Bochum. Die HCl-Konzentration betrug während der gesamten Versuchsdauer $0,2 \text{ ppm HCl}$. Im Verlauf der insgesamt 6 Tage dauernden Begasung herrschte eine Durchschnittstemperatur von 22° C . Tagsüber wurden bei klarem Wetter Spitzentemperaturen von 30° C von den in die Kleingewächshäuser eingestellten Thermohygrographen registriert. Die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit betrug im Verlaufsverlauf 77 %. Während der Nacht erreichte die Luft-

feuchtigkeit Maximalwerte von 95 %. Das Flechtenmaterial wurde wie bei der SO_2 -Begasung in Fliegengazebeuteln in dem Kleingewächshaus etwa 1 m über der Bodenoberfläche aufgehängt, in dem neben dem Versuchsmaterial noch Tomaten begast wurden.

Jeden Morgen wurden die Flechten aus dem Begasungsraum herausgenommen und mit Wasser eingesprüht. Die Kontrollflechten wurden in einem zweiten Kleingewächshaus unter den gleichen Bedingungen aber ohne HCl -Zufuhr gehalten.

Bei dem eben beschriebenen Begasungsversuch sollte einerseits die Schädigung der Flechten bei Einwirkung von HCl untersucht werden. Andererseits interessierte aber auch, ob die Flechten nach Beendigung der Begasung in der Lage sind, sich wieder von eventuell aufgetretenen Schädigungen zu erholen. Deshalb wurden in einer weiteren Versuchsserie die Flechten nach der 6 tägigen Begasung mit 0,2 ppm HCl zum Versuchsfeld des Botanischen Institutes II im Schifflerberger Wald bei Gießen gebracht und dort für 10 Tage unter Buchen der natürlichen Außenluft ausgesetzt.

Während dieser Zeit konnte an diesem Freilandstandort eine Durchschnittstemperatur von 16°C und eine durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit von 88 % gemessen werden. Die Spitzentemperaturen erreichten tagsüber 27°C , nachts konnten Werte von $10\text{--}12^\circ \text{C}$ registriert werden. Die Luftfeuchtigkeit lag nachts maximal bei 93 % und tagsüber bei 55–60 %. Nach 10 Tagen, in denen insgesamt 11,8 mm Regen fielen, wurde mit Hilfe von Gaswechsel- und Pigmentbestimmungen die Erholungsfähigkeit der Flechten nach HCl -Begasung untersucht.

4.6 Expositionsversuch zur Ermittlung von HF-Wirkungen

Für den Freilandversuch wurden verschiedene Standorte im Nordosten Limburgs ausgewählt, um den Einfluß der Immissionen der Glashütte (HF-Emittent) auf den Gassstoffwechsel und den Chlorophyllgehalt der untersuchten Flechten zu prüfen. Die Vorbereitung des Flechtenmaterials erfolgte in der gleichen Weise, wie sie bei den Begasungsversuchen geschildert wurde. Die Beutel aus Fliegengaze mit den Flechten wurden in Holzgestelle so eingespannt, daß sie selbst durch starke Winde am Expositionsort nicht zerrissen werden konnten. Im Gelände wurden 4 Standorte ausgewählt, die 50 m, 200 m, 600 m und 1600 m vom Emittenten entfernt waren. Sie wurden von der Hauptwindrichtung betroffen, d.h. sie lagen im Nordosten der Glashütte (siehe geographische Karte). Sämtliche Standorte lagen in gartenbaulich genutztem Gelände.

Die Holzgestelle wurden soweit in den Boden eingeschlagen, daß sie fest standen und die Flechten sich etwa in 1 m Entfernung von der Bodenoberfläche befanden. Bei der Aufstellung wurde darauf geachtet, daß sie Thallusoberflächen der Flechten zum Emittenten hin orientiert waren. Der Versuch dauerte vom 10.7.-7.8.73 (28 Tage). 14 Tage nach Versuchsbeginn erfolgte eine erste Bonitierung der äußerlichen Schädigung. Da nur an einer Flechtenart geringe Farbaufhellungen zu beobachten waren, wurde die Expositionszeit bis zum 7.8. ausgedehnt. Nach den Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes der Zweigstelle Stadt Limburg betrug die $\bar{\varnothing}$ Temperatur im Versuchsverlauf $17,6^{\circ}\text{C}$. Die durchschnittliche relative Luftfeuchte lag bei 74 %, während des Versuches fielen insgesamt 63,9 mm Niederschlag.

Maßstab 1: 25 000



5 Versuchsergebnisse

5.1 Begasung mit SO_2

5.1.1 CO_2 -Gaswechsel

Unmittelbar vor Beginn der Begasung mit $0,9 \text{ mg SO}_2 / \text{m}^3$ wurden mit den sieben verschiedenen für den Versuch ausgewählten Flechtenarten Gaswechselmessungen vorgenommen. Auf die so erhaltenen Ausgangswerte wurden später die Veränderungen der Photosynthese bzw. Respiration bezogen.

Besondere Bedeutung kam den Ausgangswerten der als Kontrolle eingesetzten Flechten zu. Diese kamen ja -bis auf die Schadgaszufuhr- unter die gleichen Licht-, Temperatur- und Feuchtebedingungen im Klimaschrank wie die " SO_2 -Flechten". Es zeigte sich nun, daß die Kontrollflechten während ihres Verweilens im Klimaschrank kaum Abweichungen ihres Gaswechsels von den Ausgangswerten aufwiesen.

Deshalb konnte später davon ausgegangen werden, daß ein Absinken der Werte bei den behandelten Flechten allein auf die Wirkung des SO_2 zurückzuführen ist.

Bei der Flechte Pseudevernia furfuracea (Abb. 1) konnten im Versuchsverlauf Werte für die Photosynthese der Kontrolle gemessen werden, die zwischen 220 und $248 \mu\text{O}_2/\text{h} \cdot \text{g}$ lufttrockene Substanz lagen. Bereits nach 7 tägiger Begasung zeigte die behandelte Variante eine deutlich verminderte O_2 -Entwicklung gegenüber der Kontrolle. Nach 14 tägiger Versuchsdauer traten bereits negative Werte für die apparente Photosynthese auf. Bei Versuchsabschluß nach der 28 tägigen Begasung ergab sich bei den Messungen der begasten Variante bei Belichtung ein O_2 -Verbrauch von $282 \mu\text{l}$ pro Stunde und pro Gramm lufttrockene Flechte.

Die Ergebnisse der Respirationmessungen zeigten im Versuchsverlauf einen weniger eindeutigen Einfluß von SO_2 . In den ersten drei Begasungswochen lagen die Werte der Atmung bei der begasten Variante über der Kontrolle. Demnach fand durch SO_2 zunächst eine Stimulation der Atmung von P. furfuracea statt.

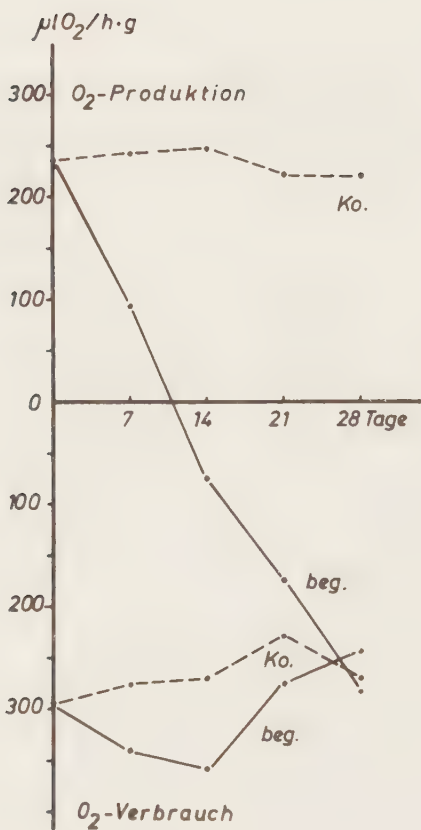


Abb. 1:
Gaswechsel von
Pseudevernia furfu-
racea bei Begasung
mit $0,9 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$

Erst bei Versuchsabschluß nach 4 wöchiger Begasung konnte ein leichtes Absinken der Respiration der begasten Variante gegenüber der Kontrolle festgestellt werden.

Hypogymnia physodes verfügte über die niedrigste photosynthetische Leistungsfähigkeit der untersuchten Flechtenarten. Die unbehandelte Variante von *H. physodes* (Abb. 2) zeigte im Versuchsverlauf eine apparente Photosynthese, die zwischen 122 und 154 $\mu\text{l O}_2/\text{h} \cdot \text{g}$ lag. Auf eine 7 tägige SO_2 -Begasung reagierte diese Art bereits mit einem deutlichen Abfall der apparenten Photosynthese bis auf Werte von 25 $\mu\text{l O}_2/\text{h} \cdot \text{g}$, d.h. der Kompensationspunkt

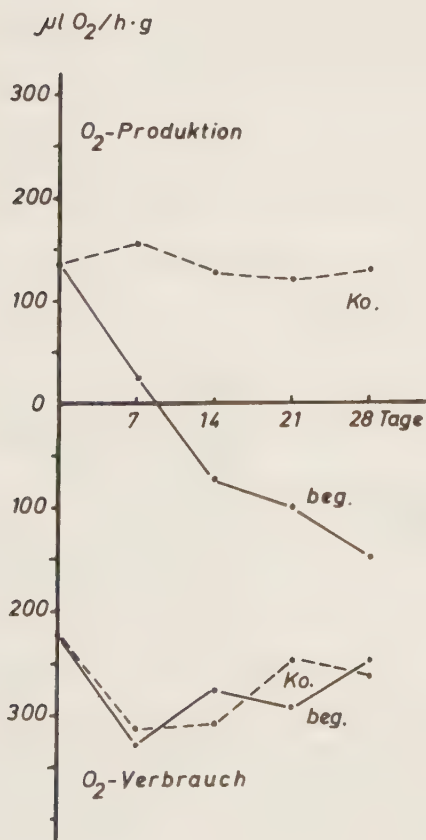


Abb. 2:
Gaswechsel von
Hypogymnia physodes
bei Begasung mit
 $0,9 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$

war fast schon erreicht. Im weiteren Versuchsverlauf konnte ein Absinken der Photosynthese bis auf negative Werte beobachtet werden. (Nach 28 tägiger Begasung betrug der O_2 -Verbrauch der begasten Variante $149 \mu l O_2/h \cdot g$ lufttr.Subs.).

Für die Respiration konnte keine Tendenz für eine Reaktion auf die vorgegebene SO_2 -Einwirkung festgestellt werden. Vorhandene Abweichungen zwischen begasten und unbegasten Thalli dürften innerhalb der Streubreite des Untersuchungsmaterials liegen.

Die Gaswechsellmessungen bei der Kontrollvariante von Par-
melia saxatilis (Abb. 3) ergaben für die apparente Photosyn-

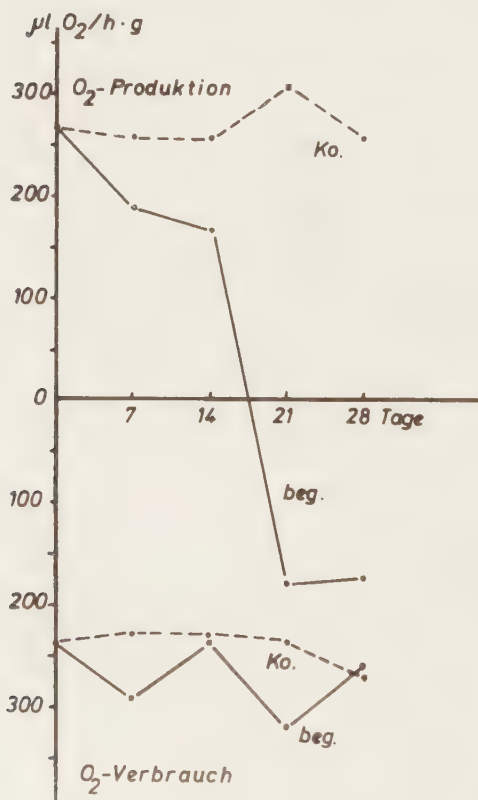


Abb. 3:

Gaswechsel von *Par-*
melia saxatilis
bei Begasung
mit $0,9 \text{ mg } SO_2/m^3$

these Werte zwischen 255 und 307 $\mu\text{l O}_2/\text{h}\cdot\text{g}$. Eine Behandlung der Flechten mit SO_2 führte während der ersten 14 Tage zu einer wesentlich geringeren Hemmung der photosynthetischen Leistungsfähigkeit als bei den vorher beschriebenen Flechtenarten. Nach 14 Tagen Begasungsdauer betrug die O_2 -Entwicklung der begasten Flechten noch rund 66 % der Kontrolle.

Erst zwischen der zweiten und dritten Versuchswoche fand unter der Einwirkung von SO_2 ein starker Abfall der Photosynthese bis unter den Kompensationspunkt statt. Nach 21 Versuchstagen konnte bei den Messungen ein O_2 -Verbrauch von 176 $\mu\text{l O}_2/\text{h}\cdot\text{g}$ festgestellt werden, der aber auch im weiteren Versuchsverlauf nicht mehr unterschritten wurde.

Eine Respirationsbeeinflussung von *P. saxatilis* ließ sich nicht klar erkennen. Möglicherweise steht die Atmungssteigerung – bei gleichzeitigem rapidem Abfall der Photosynthese – während der zweiten und dritten Begasungswoche in einem ursächlichen Zusammenhang.

Die Photosynthese von *Parmelia sulcata* (Abb. 4) wies bei den Kontrollen eine größere Schwankungsbreite innerhalb der 4 wöchigen Versuchszeit auf (216 – 317 $\mu\text{l O}_2/\text{h}\cdot\text{g}$) als die übrigen Flechtenarten. Da jedoch gegenüber dem Ausgangswert kein wesentlicher Abfall zu beobachten war, kann auch bei dieser Flechte davon ausgegangen werden, daß unter den Wachstumsbedingungen im Klimaschrank keine Beeinträchtigung der Vitalität der Flechten erfolgte, sondern daß die beobachteten Schwankungen vermutlich auf eine gewisse Ungleich-

mäßigkeit des Flechtenmaterials zurückzuführen sind.

Noch 14 Tage nach Versuchsbeginn stimmten begaste und unbegaste Flechten in ihrer photosynthetischen Leistung fast überein. Erst nach 21 tägiger Begasungszeit ergaben die Messungen ein Absinken der apparenten Photosynthese bis knapp unter den Kompensationspunkt. Nach einer weiteren

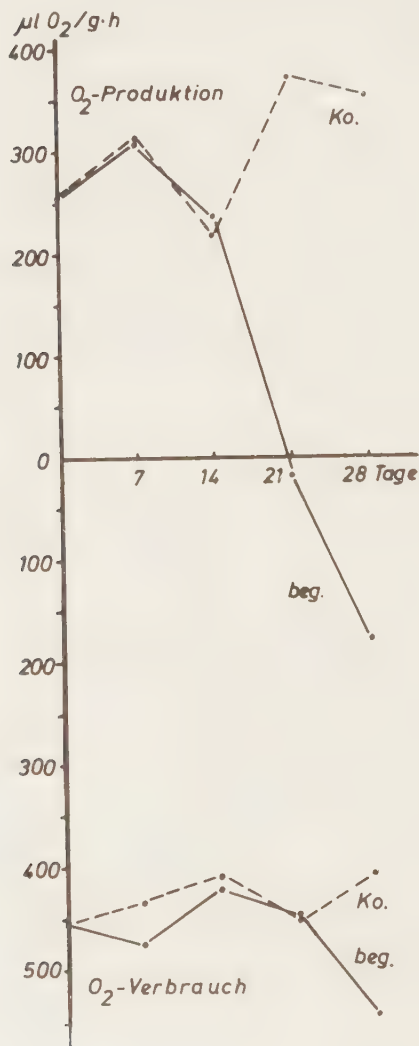


Abb. 4:

Gaswechsel von
Parmelia sulcata bei
 Begasung mit $0,9 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$

Begasungswoche sanken die Werte dann allerdings bis auf
 - 227 $\mu\text{l O}_2/\text{h}\cdot\text{g}$ ab.

Die Respiration der Flechte *P. sulcata* stimmte über einen
 3 wöchigen Zeitraum bei begasten und unbegasten Thalli über-
 ein. Eine Atmungsstimulation ergab sich erst mit dem Abfall
 der Photosynthese unter den Kompensationspunkt.

Parmelia caperata (Abb. 5), mit einer zwischen 173 - 245 μl
 $\text{O}_2/\text{h}\cdot\text{g}$ schwankenden Photosyntheserate der Kontrolle, rea-
 gierte sehr empfindlich auf die SO_2 -Zufuhr. Dies galt so-
 wohl für die Photosynthese als auch für die Respiration.

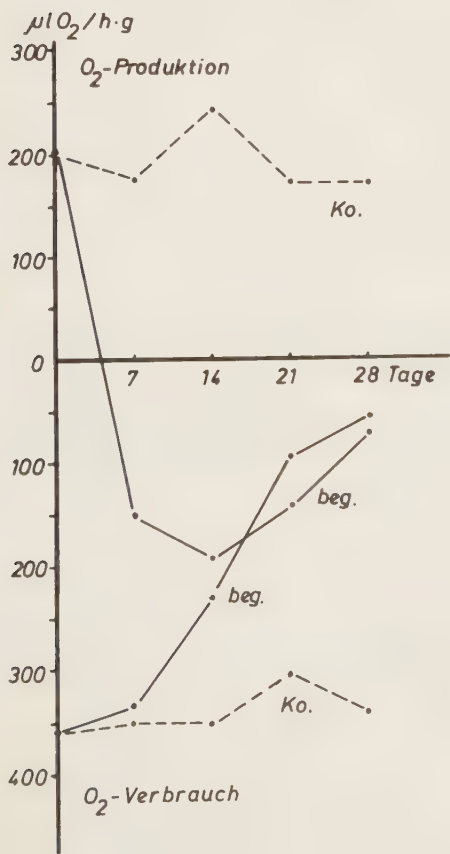


Abb. 5:

Gaswechsel von *Par-
 melia caperata* bei
 Begasung mit 0,9 mg
 SO_2/m^3

Schon nach 1 Woche war die apparente Photosynthese so stark gehemmt, daß sie negative Werte aufwies. Länger anhaltende Begasung führte zwar zu einer leichten Erholung, doch blieben die Werte unter dem Kompensationspunkt immer noch stark zurück.

Die Atmung nahm während der gesamten Versuchszeit ständig weiter ab (von 350 $\mu\text{l O}_2$ -Verbrauch zu Versuchsbeginn auf 55 $\mu\text{l O}_2$ bei Versuchsende).

Cetraria glauca (Abb. 6) wies mit 164 - 192 $\mu\text{l O}_2/\text{h g}$ im Vergleich zu den anderen untersuchten Flechtenarten eine relativ geringe photosynthetische Leistung auf. Wie bei

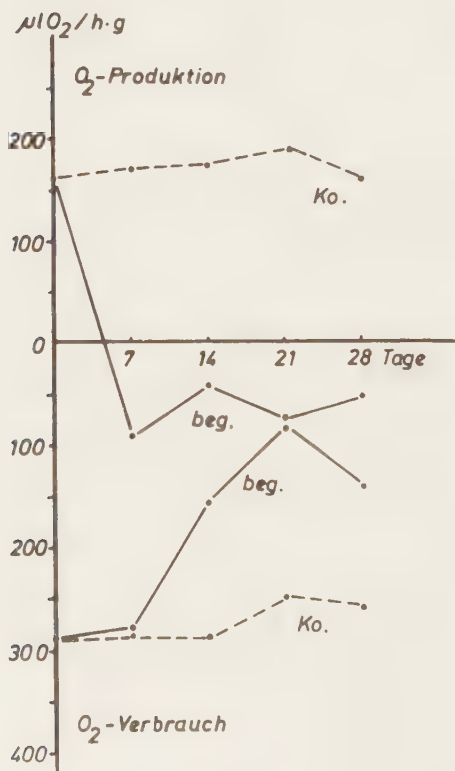


Abb. 6:

Gaswechsel von Cetraria glauca bei Begasung mit 0,9 mg SO_2/m^3

P. caperata konnte auch bei dieser Flechte bereits nach 7 tägiger Einwirkung von SO_2 eine vollständige Hemmung der apparenten Photosynthese festgestellt werden. Im weiteren Versuchsverlauf war auch hier wiederum ein erneuter leichter Anstieg der Meßwerte für die Kohlenstoffassimilation nachweisbar.

Die Respiration von *C. glauca* zeigte unter der Einwirkung von SO_2 in den ersten 7 Tagen keine Veränderung. Anschließend fand aber eine sehr deutliche Hemmung der Atmung statt, die in der letzten Versuchswoche allerdings rückläufig wurde.

Die Flechte *Xanthoria parietina* (Abb. 7) wies von allen hier untersuchten Flechtenarten mit Werten von 346 und

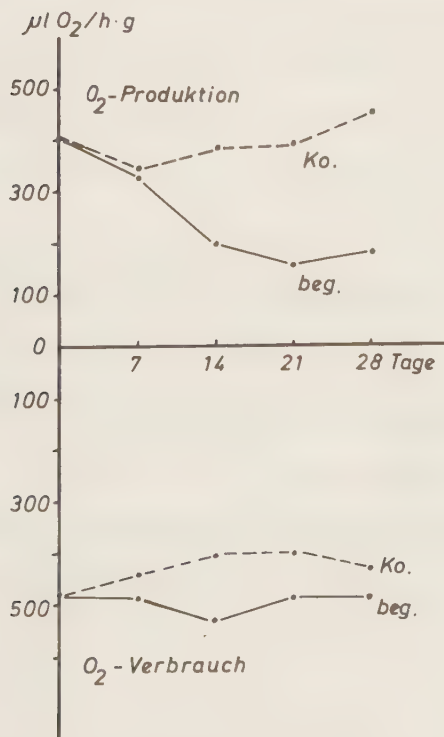


Abb. 7:

Gaswechsel von
Xanthoria parietina
bei Begasung mit
 $0,9 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$

454 $\mu\text{l O}_2$ -Entwicklung/ h · g die höchsten Photosyntheseraten unbegaster Thalli auf. Zwar zeigte sich bereits nach 7 tägiger Begasung mit SO_2 ein leichter Abfall der apparenten Photosynthese, im Gegensatz zu den übrigen 6 Flechtenarten konnte jedoch während der gesamten Versuchsdauer eine deutliche O_2 -Entwicklung bei Belichtung der begasten Flechten festgestellt werden. Während bei den anderen Species die apparente Photosynthese spätestens nach 14 tägiger Begasung vollständig gehemmt war, ergab sich für *X. parietina* sogar bei Versuchsabschluß eine Photosyntheserate der begasten Variante, die immer noch 45 % des Ausgangswertes betrug. Die Respiration dieser Flechte wurde im gesamten Versuchsverlauf durch die Einwirkung von SO_2 der gegebenen Konzentration geringfügig stimuliert.

Mit den Tabellen 1 und 2 wird eine Übersicht über die Gaswechselbefunde der verschiedenen Flechtenarten gegeben. Die eingetragenen Werte basieren auf einer Berechnung, bei der der Ausgangswert = 100 % gesetzt wurde.

Die im Versuchsverlauf bei den Kontrollwerten zu beobachtenden Schwankungen von Photosynthese und Respiration gegenüber dem Ausgangswert sind vermutlich auf Adaptationsreaktionen der Flechten auf die Klimabedingungen im Pflanzenwuchsschrank und auf ein individuelles Verhalten der verschiedenen Thalli zurückzuführen.

Aus Tabelle 1 geht deutlich die unterschiedliche Reaktion der verschiedenen Flechtenarten auf SO_2 -Begasung hervor. Nach 7 tägiger Versuchsdauer kam die Photosynthese von

Tab. 1: Apparente Photosynthese von 7 versch. Flechtenarten bei Begasung mit $0,9 \text{ mg SO}_2 / \text{m}^2$
 Relativwerte: Ausgangswert = 100 %

Art	7 Tage		14 Tage		21 Tage		28 Tage	
	Kontr.	beg.	Kontr.	beg.	Kontr.	beg.	Kontr.	beg.
<i>Pseudovernia furfuracea</i>	103	40	105	- 32	93	- 74	94	-120
<i>Hypoerymnia physodes</i>	114	19	95	- 54	90	- 74	98	-110
<i>Larmelia saxatilis</i>	96	70	95	63	114	- 65	95	- 63
<i>Larmelia sulcata</i>	123	123	85	94	146	- 7,5	139	- 89
<i>Larmelia caperata</i>	86	- 74	121	- 94	86	- 69	85	- 34
<i>Cetraria glauca</i>	105	- 55	107	- 24	117	- 43	100	- 30
<i>Xanthoria parietina</i>	86	81	96	49	99	39	113	45

P. caperata und *C. glauca* bereits völlig zum Erliegen. Bei *H. physodes* und *P. furfuracea* zeigte sich bereits eine gut erfaßbare, bei *P. saxatilis* eine geringe Hemmung der photosynthetischen Leistungsfähigkeit. Nur die Werte von *X. parietina* und *P. sulcata* zeigten keinen Abfall unter der Einwirkung von SO_2 .

Nach 14 tägiger Versuchsdauer ließ sich auch bei *H. physodes* und *P. furfuracea* eine vollständige Hemmung der apparenten Photosynthese feststellen. Bei *X. parietina* und *P. saxatilis* waren die Photosyntheseraten auf etwa die Hälfte gegenüber dem Ausgangswert abgesunken. Lediglich *P. sulcata* wies noch keine ausgeprägte Depression der Photosynthese der begasten Variante gegenüber dem zu Versuchsbeginn gemessenen Wert auf.

Nach dreiwöchiger Einwirkung von SO_2 auf die 7 Flechtenarten zeigte nur noch *X. parietina* eine O_2 -Entwicklung bei Belichtung, während stattdessen alle anderen Flechtenarten einen O_2 -Verbrauch aufwiesen.

Bei Versuchsabschluß konnte bei *X. parietina* eine apparente Photosyntheserate der begasten Variante gemessen werden, die noch 45 % des Ausgangswertes betrug. *P. furfuracea* und *H. physodes* besaßen mit -120 und -110 % die negativsten Werte. *P. sulcata* und *P. saxatilis* folgten mit -89 und -63 %. Die beiden Flechtenarten, die zu Versuchsbeginn die stärkste Photosynthesehemmung aufwiesen, zeigten bei Versuchsabschluß Relativwerte von -34 und -30 % (*P. caperata*, *C. glauca*).

In Tabelle 2 erfolgt die Darstellung der Respirationsmessungen aller 7 Flechtenarten. Eine eindeutige Abnahme der Dunkelatmung der Flechten konnte im Versuchsverlauf lediglich bei *P. caperata* und *C. glauca* festgestellt werden. Außer *P. furfuracea* zeigten alle anderen untersuchten Flechtenarten nach 7 tägiger Begasung zunächst einen Anstieg der Respiration gegenüber dem Ausgangswert.

Im weitem Versuchsverlauf konnte bei den begasten Flechten sowohl eine Stimulation als auch eine Depression der Atmung ermittelt werden.

Bei Versuchsabschluß zeigten *P. sulcata* mit 119 %, *H. physodes* mit 112 %, *P. saxatilis* mit 108 % und *X. parietina* mit 102 % noch immer eine Stimulation der Respiration gegenüber dem Ausgangswert. Bei *P. furfuracea* betrugen die Respirationswerte der begasten Variante dagegen nur noch 81 %, bei *C. glauca* 47 % und bei *P. caperata* 15 % des vor Beginn des Begasungsversuches gemessenen Wertes.

Als weiteres Kriterium zum Nachweis einer Beeinflussung des Gasstoffwechsels der Flechten wurde aus den Werten der apparenten Photosynthese und der Dunkelatmung die reelle Photosynthese der sieben Flechtenarten berechnet.

Für *P. furfuracea* (Abb. 8) ergab sich hiernach von der ersten Messung nach 7 tägiger Begasung an ein gleichmäßiger Abfall der reellen Photosynthese gegenüber den Kontrollwer-

Tab. 2: Atmung von 7 versch. Flechtenarten bei Begasung mit $0,9 \text{ mg SO}_2 / \text{m}^2$
 Relativwerte: Ausgangswert = 100 %

Art	7 Tage		14 Tage		21 Tage		28 Tage	
	Kontr.	beg.	Kontr.	beg.	Kontr.	beg.	Kontr.	beg.
<i>Pseudovernia furfuracea</i>	114	93	90	120	76	91	90	81
<i>Hypoerymnia physodes</i>	142	148	139	124	112	132	118	112
<i>Parmelia saxatilis</i>	98	119	99	99	101	138	111	108
<i>Parmelia sulcata</i>	95	104	90	92	99	99	88	119
<i>Parmelia caperata</i>	97	65	98	63	84	25	95	15
<i>Cetraria Glauca</i>	98	95	99	54	85	27	88	47
<i>Xanthoria parietina</i>	91	101	85	110	84	101	90	102

ten.

Dies bedeutet, daß auch bei der belichteten und damit photosynthetisch aktiven Flechte eine negative Stoffbilanz vorliegt. Hierbei wird allerdings davon ausgegangen, daß der gemessene Atmungswert im Dunkelen nicht wesentlich von dem bei Belichtung abweicht.

Die Flechte H. physodes (Abb. 9) zeigte während der ersten 7 Tage der Begasung keinen Abfall der reellen Photosynthese. Im weiteren Versuchsverlauf sanken die Werte

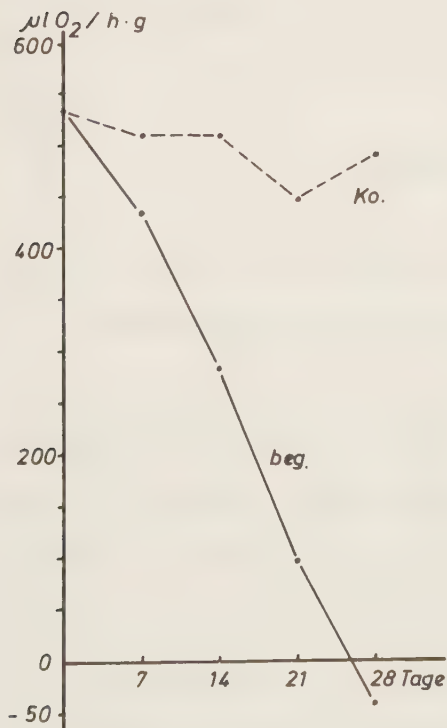


Abb. 8:

Reelle Photosynthese
von *P. furfuracea* bei
Begasung mit 0,9 mg
SO₂/m³
µl O₂-Entst. bzw. Ver-
brauch/h g lufttr.
Substanz

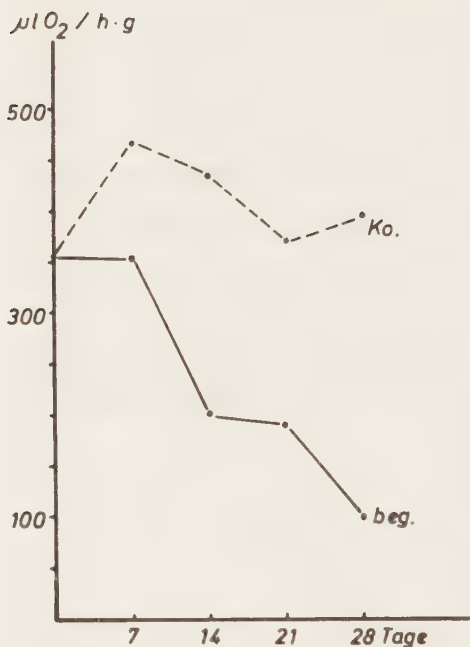


Abb. 9:

Reelle Photosynthese
von *H. physodes* bei
Begasung mit 0,9 mg
 SO_2 / m^3

jedoch erheblich ab, ohne aber auf Werte unter 0 abzufallen.

Auch *P. saxatilis* (Abb. 10) wies unter SO_2 -Begasung nur einen geringeren Abfall der reellen Photosynthese auf.

Nach 14 tägiger Begasung betrug sie immer noch etwa 80 % des Ausgangswertes. Mit zunehmender Begasungszeit konnte jedoch auch bei dieser Flechtenart eine Abnahme der reellen Photosynthese beobachtet werden, doch auch hier waren die Werte nach 28 Versuchstagen noch positiv.

Für die Flechte *P. sulcata* (Abb. 11) ergab sich für die ersten 7 Tage des Versuches eine geringe Stimulation der reellen Photosynthese. Auf diese folgte allerdings nach

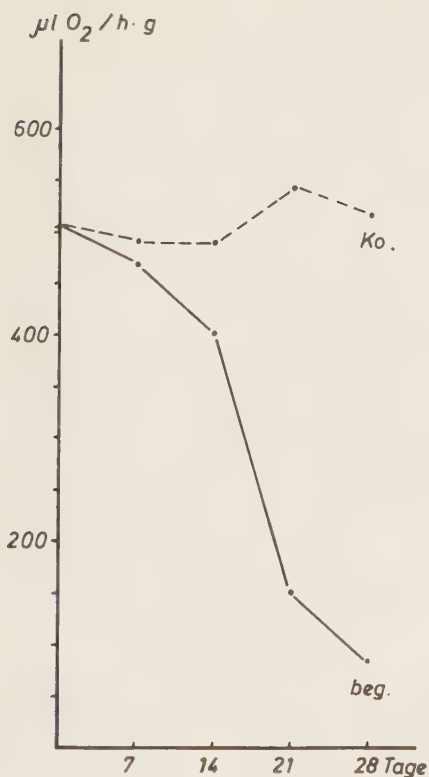


Abb. 10:

Reelle Photosynthese
von *P. saxatilis* bei
Begasung mit 0,9 mg
SO₂/ m³

21 Tagen eine sehr merkliche Depression, jedoch blieben selbst nach Abschluß des 28 tägigen Begasungsversuches die Werte positiv. Mit einer O₂-Bildung von rund 300 µl O₂/h · g erreichte *P. sulcata* bei Versuchsabschluß den zweithöchsten Wert der realen Photosynthese innerhalb der 7 untersuchten Flechten.

Die Begasung mit SO₂ bewirkte bei *P. caperata* (Abb. 12) bereits nach 7 Tagen einen erheblichen Abfall der realen

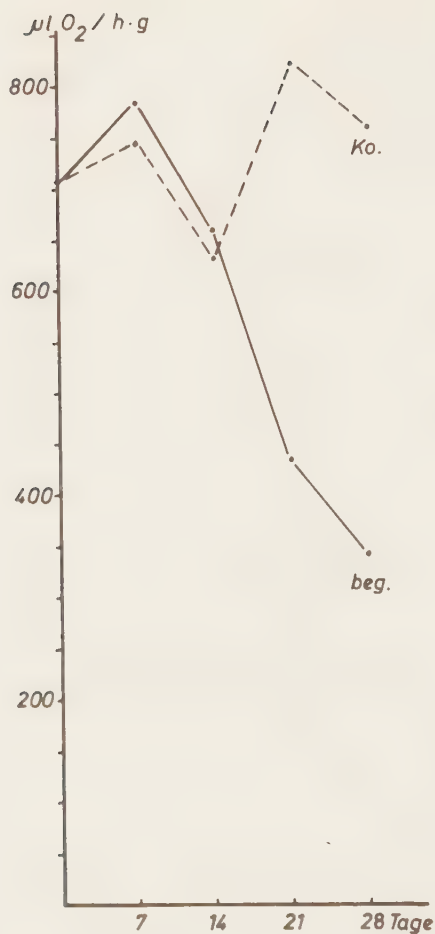


Abb. 11:

Reelle Photosynthese
von *P. sulcata* bei Be-
gasung mit 0,9 mg SO₂/m³

Photosynthese. Nach 14 tägiger Versuchsdauer sanken die Werte annähernd bis auf 0 ab und waren von da ab negativ. Somit reagierte diese Flechte von allen untersuchten Arten mit der stärksten Depression ihrer reellen Photosynthese.

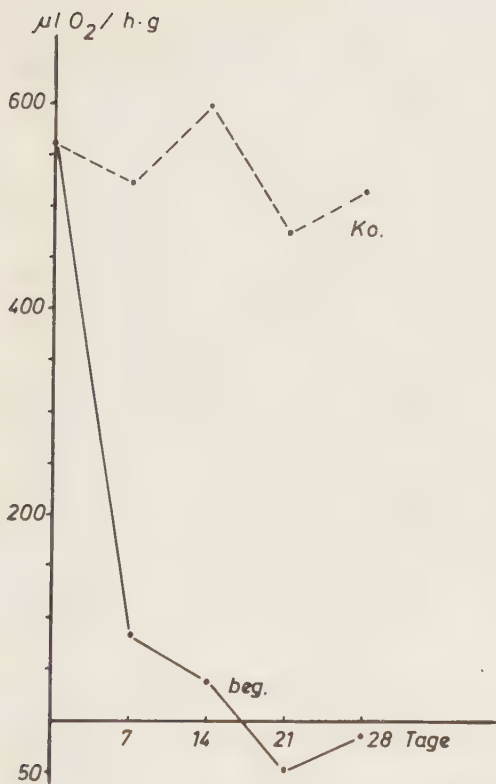


Abb. 12:

Reelle Photosynthese
von *P. caperata* bei
Begasung mit 0,9 mg
SO₂/ m³

Auch *C. glauca* (Abb. 13) reagierte empfindlich auf eine SO₂-Begasung. So fiel unter dem Schadgaseinfluß die reelle Photosynthese bis fast auf den Nullpunkt ab, ohne jedoch negativ zu werden.

Als resistanteste Species der untersuchten Flechten erwies sich *X. parietina* (Abb. 14), die sowohl die absolut höchste assimilatorische Leistung erbrachte und deren

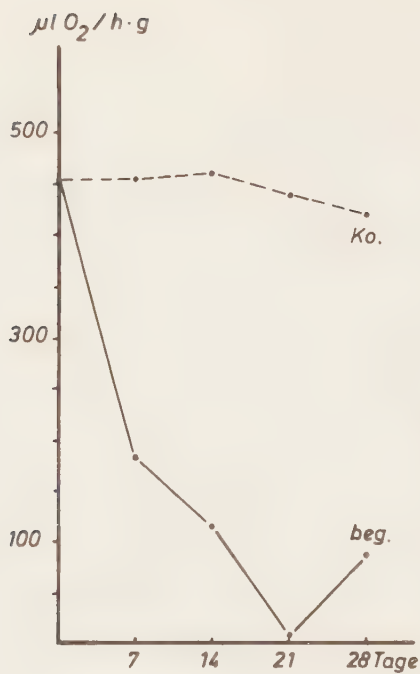


Abb. 13:

Reelle Photosynthese
von *C. glauca* bei Be-
gasung mit 0,9 mg SO₂/m³

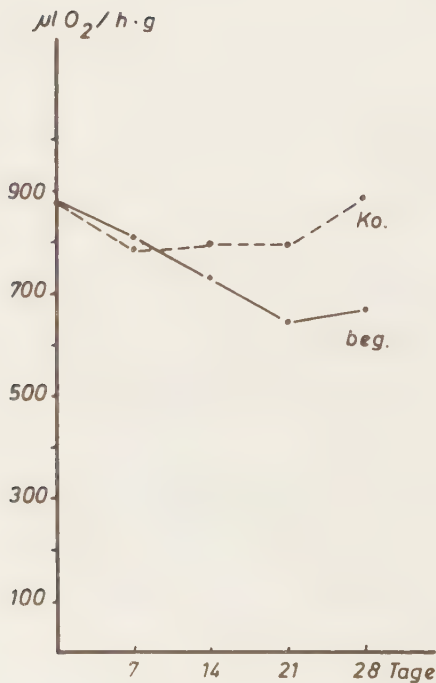


Abb. 14:

Reelle Photosynthese
von *X. parietina* bei
Begasung mit 0,9 mg SO₂
pro m³

reelle Photosynthese bei SO_2 -Begasung kaum beeinträchtigt wurde. Selbst nach 28 tägiger SO_2 -Begasung betrug die reelle Photosynthese noch fast 80 % des Ausgangswertes.

Aus Tabelle 3 geht deutlich die unterschiedliche Beeinflussung der reellen Photosynthese der verschiedenen Flechtenarten bei Begasung mit SO_2 hervor. Ähnlich wie bei den Ergebnissen der apparenten Photosynthese reagierten *P. caperata* und *C. glauca* nach 7 Tagen am empfindlichsten auf die SO_2 -Behandlung. *P. furfuracea* zeigte eine deutliche Depression der reellen Photosynthese, während die Werte derübrigen Flechtenarten innerhalb der Streubreite des Untersuchungsmaterials lagen.

Im weiteren Versuchsverlauf konnte bei allen Flechtenarten eine mehr oder weniger starke Depression ihrer reellen Photosynthese beobachtet werden.

Bei Versuchsabschluß zeigten *P. furfuracea* und *P. caperata* als einzige negative Werte. Die reelle Photosynthese von *P. saxatilis*, *C. glauca* und *H. physodes* betrug noch zwischen rund 15 - 30 % des Ausgangswertes. Bei *P. sulcata* war dagegen die reelle Photosynthese nur um rund die Hälfte gegenüber dem Ausgangswert abgefallen, während bei *X. parietina* mit 75 % des Anfangswertes der geringste Einfluß von SO_2 nachgewiesen werden konnte.

Tab. 5: Reelle Photosynthese von 7 versch. Flechtenarten bei Befassung mit 0,9 mg SO_2/m^2
relativwerte: Ausgangswert = 100 %

Art	7 Tage		14 Tage		21 Tage		28 Tage	
	kontr. •	beg. •	Kontr. •	beg. •	kontr. •	beg. •	Kontr. •	beg. •
Leodevernia furfuracea	109	70	97	53	84	18	92	- 8
Hypogymnia physodes	131	100	122	56	104	54	110	28
Larmelia saxatilis	97	93	97	80	108	30	103	17
Larmelia sulcata	105	111	88	93	116	61	107	44
Larmelia caperata	93	15	106	7	85	- 9	92	- 3
Cetraria glauca	100	40	101	25	97	2	93	20
Xanthoria parietina	89	92	90	83	91	73	100	76

5. 5. Chlorophyllgehalt

Der Restchlorophyllgehalt der Kontrolle von P. furfuracea (Abb. 15) schwankte im Versuchsverlauf zwischen 1,00 und 1,11 mg Chlorophyll pro Gramm lufttrockene Substanz. Eine 7 tägige Begasung führte bereits zu einem deutlichen Abfall des Chlorophyllgehaltes. Nach 14 Tagen Versuchsdauer betrug der Wert der begasten Flechten nur noch etwa 1/3, und sank nach 28 Tagen auf 0,14 mg Chlorophyll/g, d.h. rund 1/10 des Ausgangswertes ab.

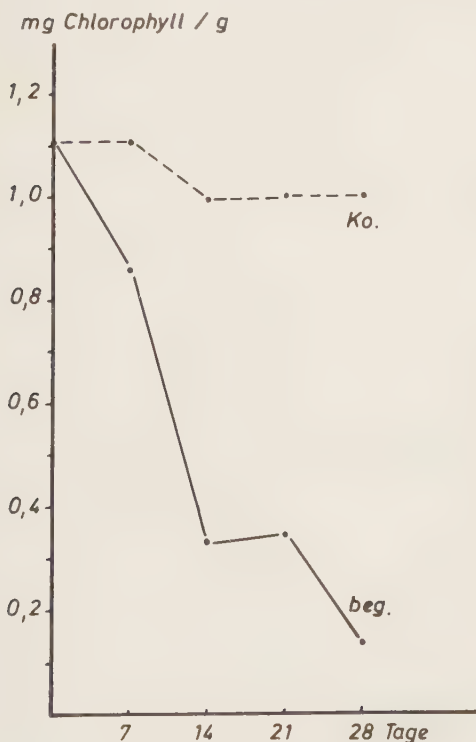


Abb. 15:
Chlorophyllgehalt
von P. furfuracea
bei Begasung mit
 $0,9 \text{ mg SO}_2 / \text{m}^3$

Der Chlorophyllgehalt der Kontrolle von H. physodes (Abb. 16) lag während des Versuches zwischen 0,94 und 1,06 mg Chlorophyll/g und entsprach damit dem von L. furfuracea. Im Gegensatz zu der letztgenannten Art führte eine 7 tägige Begasung mit SO_2 jedoch noch nicht zu einem Absinken des Chlorophyllgehaltes. Dies konnte erst nach 14 Tagen Versuchsdauer festgestellt werden. Bis zum Versuchsende war keine weitere Veränderung im Chlorophyllgehalt festzustellen. Nach 28 Tagen Begasung mit SO_2 betrug der Chlorophyllgehalt der Flechten noch rund die Hälfte des Ausgangswertes.

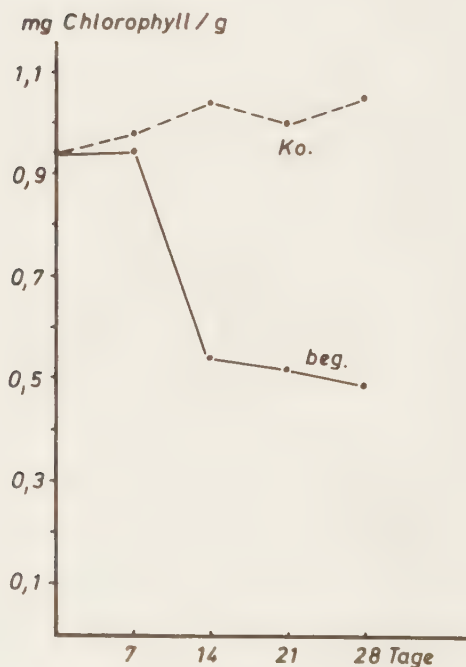


Abb. 16:
Chlorophyllgehalt
von H. physodes
bei Begasung mit
 $0,9 \text{ mg SO}_2 / \text{m}^3$

Für *P. saxatilis* (Abb. 17) ließen sich im Versuchsverlauf Chlorophyllgehalte der Kontrolle zwischen 1,66 und 1,89 mg Chlorophyll/g feststellen. Der Pigmentgehalt war demnach höher als derjenige der zuvor beschriebenen Arten. Im Laufe der Begasung zeigte sich zunächst ein geringer, später ein stärkerer Abfall des Chlorophyllgehaltes bis auf Werte von 0,56 mg Chlorophyll/g nach 28 Tagen, was mithin einen Chlorophyllschwund von rund 2/3 bedeutete.

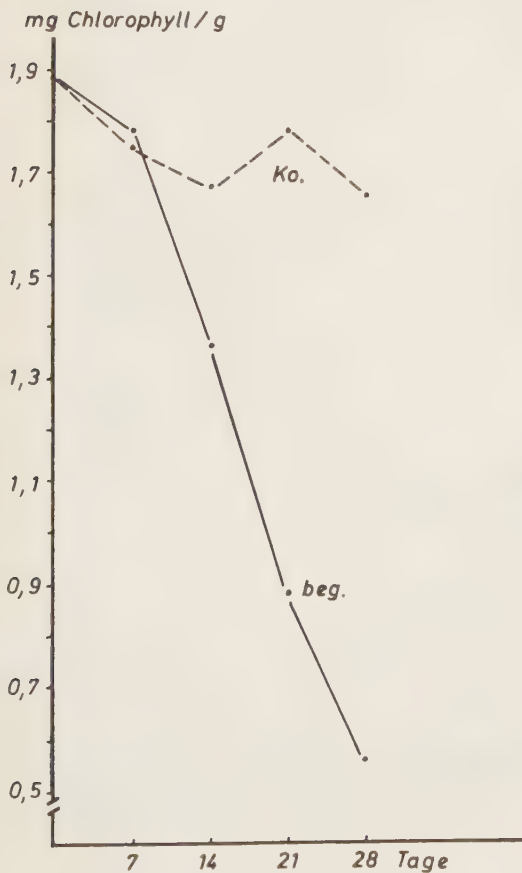


Abb. 17:
Chlorophyllgehalt
von *P. saxatilis*
bei Begasung mit
0,9 mg SO₂/ m³

Für P. sulcata (Abb 18) ließ sich ebenfalls ein hoher Chlorophyllgehalt von 1,86 bis 2,08 mg konstatieren. Nach 7 Tagen SO_2 -Begasung setzte bereits ein deutlicher Chlorophyllabbau ein, so daß zu Versuchsabbruch nach 28 Tagen nur noch etwa die Hälfte des Ausgangswertes gemessen werden konnte.

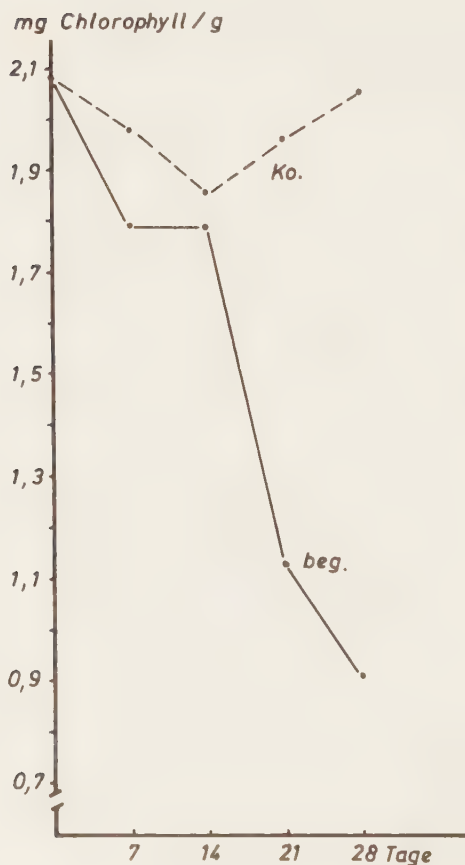


Abb. 18:
Chlorophyllgehalt
von *P. sulcata*
bei Begasung mit
 $0,9 \text{ mg SO}_2 / \text{m}^3$

P. caperata (Abb. 19) besaß mit Werten zwischen 0,49 und 0,65 mg Chlorophyll/g den niedrigsten Chlorophyllgehalt von allen hier untersuchten Flechtenarten. Es zeigte sich in den ersten 14 Versuchstagen unter SO_2 -Einfluß ein starker Abfall des Chlorophyllgehaltes., der bei anhaltender Begasungsdauer jedoch nicht mehr rückläufig war.

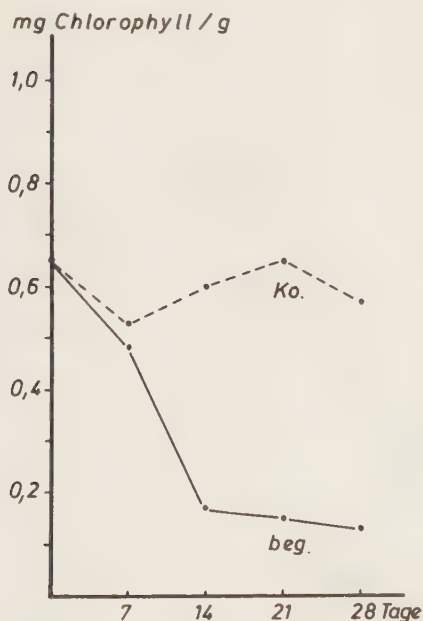


Abb. 19:
Chlorophyllgehalt
von P. caperata
bei Begasung mit
 $0,9 \text{ mg SO}_2 / \text{m}^3$

Der Gesamtchlorophyllgehalt der Kontrolle von C. glauca (Abb. 20) lag mit 1,01 bis 1,19 mg/g auf etwa gleicher Höhe wie bei P. furfuracea und H. physodes. Im Laufe der 26 tägigen Begasung zeigten die Messungen einen schon nach

7 Tagen einsetzenden und bis zum Versuchsabschluß anhaltenden Chlorophyllabbau an. Nach 28 Versuchstagen lag der Chlorophyllgehalt nur noch unter 1/10 des Ausgangswertes.

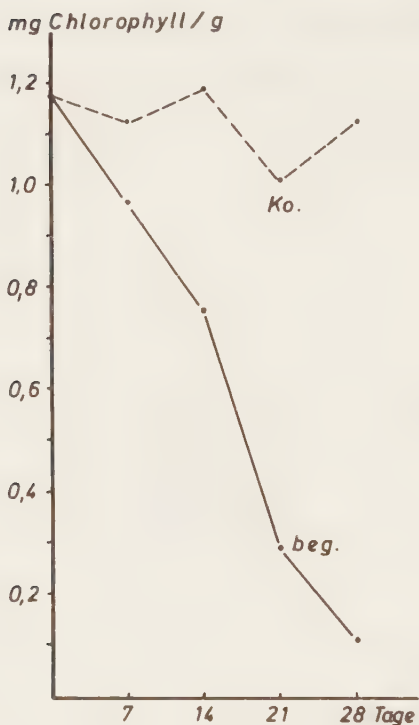


Abb. 20:

Chlorophyllgehalt von
C. glauca bei Begasung
mit 0,9 mg SO₂/ m³

Für *X. parietina* (Abb. 21) mit einem Gesamtchlorophyllgehalt der Kontrolle von 1,80 bis 1,97 mg ergaben sich innerhalb der ersten Begasungswoche keine wesentlichen Veränderungen des Chlorophyllgehaltes. Dieser sank bei anhaltender SO₂-Zufuhr zwar ab, jedoch wies *X. parietina*

bei Versuchsabschluß mit 1,22 mg Chlorophyll/g den höchsten Chlorophyllgehalt von allen untersuchten Flechtenarten auf.

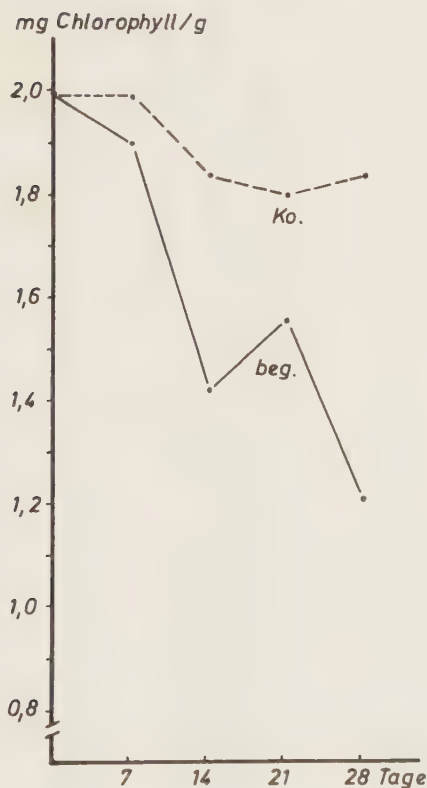


Abb. 21:
Chlorophyllgehalt
von *X. parietina*
bei Begasung mit
0,9 mg SO₂/ m³

In Tabelle 4 erfolgt die Darstellung der Relativwerte des Chlorophyllgehaltes der untersuchten Flechten. Wiederum diene der zu Versuchsbeginn gemessene Ausgangswert als Bezugsgröße.

Tab. 4: Chlorophyllgehalt von 7 versch. Flechtenarten bei Fekung mit 0,9 mg $30\% / m^2$
 Aktivierwert: Ausgangswert = 100 %

Art	7 Tage		14 Tage		21 Tage		28 Tage	
	kontr.	beg.	kontr.	beg.	kontr.	beg.	kontr.	beg.
Pseudovernia furfuracea	95	77	90	30	92	32	91	12
Myco yinia mycoses	104	70	111	50	107	55	112	52
Parmelia saxatilis	92	94	88	72	95	47	88	30
Parmelia sulcata	95	86	89	86	94	54	99	44
Parmelia caperata	81	75	94	27	100	23	88	20
Cetraria flauca	96	82	100	64	85	25	95	9
Xanthoria parietina	100	97	94	73	92	80	94	01

5.1.3 Schwefelgehalt

Der Gesamtschwefelgehalt (Tabelle 1) des Flechtenausgangsmaterials lag zwischen 1340 (*P. caperata*) und 3900 μ S/g TS (*X. parietina*).

während bei *P. furfuracea*, *P. saxatilis*, *P. sulcata* und *X. parietina* der Gehalt an organisch gebundenem Schwefel den an anorganisch gebundenem übersteigt, liegt der Gehalt an organisch gebundenem Schwefel bei *H. physodes*, *P. caperata* und *C. glauca* niedriger als der Gehalt an Sulfatschwefel.

Nach 28 tägiger Begasung war der Gesamtschwefelgehalt gegenüber dem Ausgangswert bei *P. sulcata*, *P. saxatilis* und *P. furfuracea* angestiegen. Bei der Flechte *H. physodes* war keine Veränderung gegenüber dem Ausgangswert festzustellen. Bei *X. parietina*, *P. caperata* und *C. glauca* lag der Gesamtschwefelgehalt bei Versuchsabschluß unter den Werten, die vor Beginn der Begasung ermittelt werden konnten.

Mit Ausnahme von *C. glauca* zeigten alle Flechtenarten nach 28 tägiger SO_2 -Begasung einen Anstieg ihres Gehaltes an organisch gebundenem Schwefel. Im Gegensatz dazu konnte bei allen Flechtenarten außer *P. furfuracea* ein Absinken des Gehaltes an ^{an}organischem Schwefel bei Versuchsabschluß festgestellt werden.

Tab. 5: Schwefelgehalt von 7 versch. Flechtenarten bei Begasung mit 0,9 mg SO₂/m³
 ♂ Schwefel/ g WS

Art	Ausgangsmaterial			Kontrolle n. 28 Tagen			begast nach 28 Tage n		
	org. •	anorg. •	Gesamt	org. •	anorg. •	Gesamt	org. •	anorg. •	Gesamt
Pseudevernia furfuracea	960	940	1900	970	970	1940	1100	1060	2160
hypogymnia physodes	900	1400	2300	970	1480	2450	1180	1130	2310
Larmelia saxatilis	1420	860	2280	1360	860	2220	1670	680	2350
Larmelia sulcata	1760	1000	2760	1570	970	2540	2130	970	3100
Larmelia caperata	500	840	1340	660	930	1590	630	630	1260
Cetraria glauca	800	860	1660	860	860	1720	760	610	1370
Xanthoria parietina	2340	1560	3900	2460	1220	3680	2620	970	3590

5.2 Begasung mit HCl

5.2.1 O₂-Gaswechsel

Auch bei dem Begasungsexperiment mit HCl wurden kurz vor dem Einsetzen der Flechten in die kleingewächshäuser Gaswechsellmessungen vorgenommen, um die im Versuchsverlauf festzustellenden Veränderungen der Photosynthese bzw. Respiration später auf diese Ausgangswerte zu beziehen. Die in den kontrollgewächshäusern eingebrachten Flechten zeigten bei gleichen Temperatur-, Licht- und Feuchtebedingungen wie die mit HCl begasten Varianten während ihres Aufenthaltes im Gewächshaus kaum Abweichungen des Gaswechsels gegenüber den Ausgangswerten. Daher konnte davon ausgegangen werden, daß meßbare Schädigungen an den Thalli auf der Einwirkung von HCl beruhten.

Die Respiration der Flechte Pseudevernia furfuracea (Abb.22) wurde bei Begasung mit HCl gegenüber dem Ausgangswert leicht gesteigert.

Diese Stimulation der Dunkelatmung konnte in verstärkter Form auch bei Hypogymnia physodes nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu wies die Flechte Parmelia saxatilis nach 6 tägiger Einwirkung von HCl eine Depression der Respirationswerte auf. Parmelia sulcata zeigte bei HCl-Begasung keine eindeutige Abweichung der Dunkelatmung gegenüber dem Ausgangswert, ein Verhalten, das auch bei Xanthoria parietina zu beobachten war. Cetraria glauca reagierte auf die 6 tägige HCl-Begasung mit einer deutlichen Depression der Werte der Dunkelatmung.

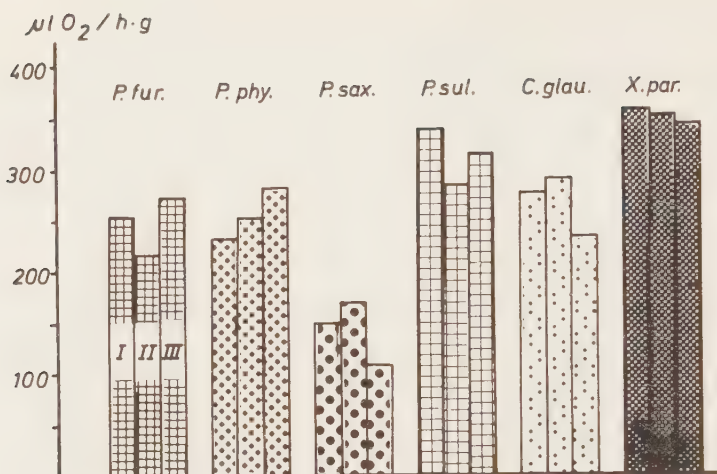


Abb. 22: Atmung von 6 verschiedenen Flechtenarten bei Begasung mit 0,2 ppm HCl (Begasungszeit 6 Tage)

I : Ausgangswert

II: Kontrolle

III: begast

-  *P. furfuracea*
-  *H. physodes*
-  *P. saxatilis*
-  *P. sulcata*
-  *C. glauca*
-  *X. parietina*

In Tabelle 6 erfolgte die Darstellung der Relativwerte der Respiration aller 6 Flechtenarten. Eine eindeutige Abnahme der Dunkelatmung konnte nur bei *P. saxatilis* und *C. glauca* festgestellt werden.

Als weiteres Kriterium zum Nachweis der Beeinflussung des Gasstoffwechsels unter HCl-Einfluß wurde die reelle Photosynthese herangezogen. Wie Abbildung 23 zeigt, führte eine

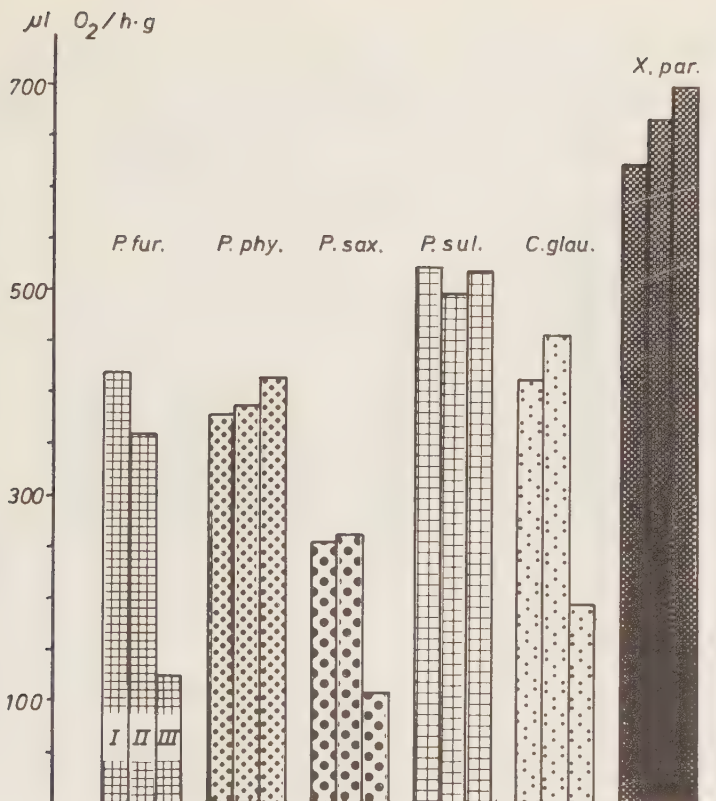


Abb. 23: Reelle Photosynthese von 6 verschiedenen Flechtenarten nach 6 tägiger Begasung mit 0,2 ppm HCl

6 tägige HCl-Begasung bei der Flechte *P. furfuracea* zu einem Abfall der reellen Photosynthese von Werten um 400 µl O₂/h·g bis auf 125 µl O₂/h·g. Bei *H. physodes* lag die reelle Photosynthese bei Versuchsabschluß bei der begasten Variante über dem Ausgangswert. *P. saxatilis* reagierte auf die HCl-Begasung mit einem Abfall der reellen Photosynthese um mehr als die Hälfte. Eine annähernd gleichstarke Schwächung wies *C. glauca* auf. Bei der Flechte *P. sulcata* ließ sich bei Versuchsabschluß bei der begasten Variante eine

gegenüber dem Ausgangswert unveränderte reelle Photosynthese beobachten. Bei X. parietina führte eine HCl-Begasung zu einem Anstieg dieser Größe des Gasstoffwechsels.

In Tabelle 6 erfolgt die Darstellung der Relativwerte der reellen Photosynthese aller 6 Flechtenarten.

Eine weitere wichtige Größe der C-Bilanz stellt die Netto-photosynthese oder apparente Photosynthese dar. Bei der Flechte P. furfuracea (Abb. 24) führte eine 6 tägige Begasung mit HCl zu einer starken Depression der apparenten Photosynthese bis weit unter den Kompensationspunkt. Im Gegensatz dazu erfuhr die O_2 -Entwicklung von H. physodes bei Belichtung kaum eine Veränderung unter dem Einfluß von HCl. Die Gaswechsellmessungen bei P. saxatilis ergaben nach 6 tägiger HCl-Einwirkung ein Absinken der apparenten Photosynthese bis knapp unter den Kompensationspunkt. Bei P. sulcata wies dagegen die begaste Variante sogar eine leichte Stimulation der Photosynthese gegenüber dem Ausgangswert auf.

Die Flechte C. glauca reagierte auf die Begasung mit HCl sehr empfindlich. Nach 6 tägiger Versuchsdauer war der Kompensationspunkt deutlich unterschritten. Die Flechte X. parietina wies bei den Kontrollwerten die höchste photosynthetische Leistungsfähigkeit der sechs untersuchten Flechtenspecies auf. Nach einer Versuchszeit von 6 Tagen führte eine HCl-Begasung sogar zu einer erheblichen Stimulation der apparenten Photosynthese.

Mit der Tabelle 6 wird eine Übersicht über die Messungen

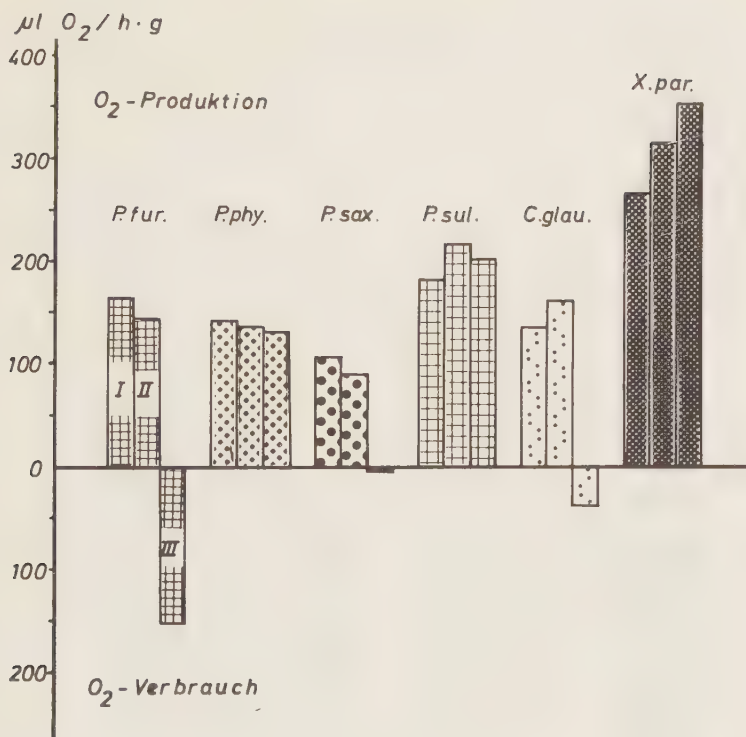


Abb. 24: Apparente Photosynthese von 6 verschiedenen Flechtenarten nach 6 tägiger Begasung mit 0,2 ppm HCl

der Photosynthese der verschiedenen Flechtenarten gegeben. Die dargestellten Werte beruhen auf der Berechnung der Relativwerte, indem der Ausgangswert = 100 % gesetzt wurde. Durch die 6 tägige HCl-Begasung kam die apparente Photosynthese von *P. furfuracea*, *C. glauca* und *P. saxatilis* völlig zum Erliegen. Die Werte von *H. physodes* zeigten keine Veränderung, bei *P. sulcata* und *X. parietina* erfolgte eine Stimulation der apparenten Photosynthese.

3.2.2 Chlorophyllgehalt

Die Bestimmung des Chlorophyllgehaltes (Abb. 25) ergab bei L._furfuracea, einer Flechte, deren Photosynthese unter dem Einfluß von HCl eine starke Depression zeigte, einen etwa gleichbleibenden Chlorophyllgehalt. Zu Versuchsbeginn betrug der Chlorophyllgehalt 0,94 mg/g, zu Versuchsende 0,96 mg/g. Auch bei H._physodes blieb der Pigmentgehalt nach der Begasung fast auf gleicher Höhe (Ausgangswert 0,88 mg/g, nach der Begasung 0,85 mg Chlorophyll/g).

Den stärksten Pigmentabbau wies P._saxatilis auf. Bei dieser Species sank der Chlorophyllgehalt von 0,66 mg/g zu Versuchsbeginn auf 0,21 mg/g nach einer HCl-Begasung von 6 Tagen ab, was einem Chlorophyllschwund von etwa 2/3 entsprach. P._sulcata zeigte keine eindeutige Veränderung des Chlorophyllgehaltes im Verlauf der 6 tägigen HCl-Einwirkung. Der bei Versuchsabschluß gemessene Wert von 1,22 mg Chlorophyll/g lag knapp über dem Ausgangswert von 1,08 mg/g.

C._glauca wies trotz starker Depression der Photosynthese eher einen leichten Anstieg des Pigmentgehaltes (von 1,10 mg/g auf 1,17 mg Chlorophyll/g) bei Versuchsabschluß auf. Eine Begasung mit HCl führte bei X._parietina, die mit 1,34 mg Chlorophyll/g den höchsten Chlorophyllgehalt der untersuchten Flechtenarten aufwies, zu einem deutlichen Anstieg des Pigmentgehaltes gegenüber dem Ausgangswert.

In Tabelle 6 erfolgt die Darstellung der Relativwerte des Chlorophyllgehaltes aller 6 Flechtenarten. Eine eindeutige Abnahme des Chlorophyllgehaltes unter dem Einfluß von

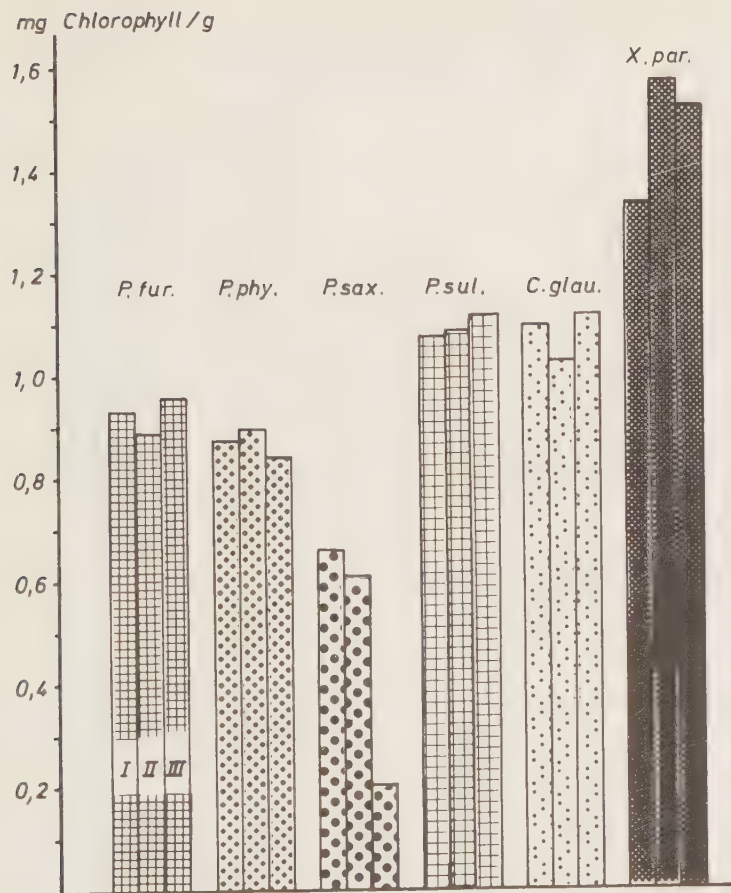


Abb. 25: Chlorophyllgehalt von 6 verschiedenen Flechtenarten nach 6 tägiger Begasung mit 0,2 ppm HCl

0,2 ppm HCl konnte nur bei *P. saxatilis* beobachtet werden. Der Pigmentgehalt der übrigen Species zeigte keine charakteristische Veränderung nach der 6 täglichen Einwirkung des Schadgases HCl.

Tab. 1: relative Werte des Gasaustauschs und des Chlorophyllgehaltes von 6 Flechtenarten nach 6 tägiger Belichtung mit 0,2 ppm HCl (Ausgangswert = 100 %)

Art	Atmung		Reelle Photosynth.		apparente Photosynth.		Chlorophyllgehalt	
	kontr.	bel.	kontr.	bel.	kontr.	bel.	kontr.	bel.
Leodevernia furfuracea	85	109	66	30	37	- 93	55	103
Lycopodium obscurum	106	120	102	110	95	93	103	97
Larmelia saxatilis	115	73	101	42	84	- 3	92	30
Larmelia sulcata	83	93	93	96	118	109	101	104
Uetraria elaeagnifolia	105	83	110	47	120	- 27	94	106
Xanthoria parietina	99	97	107	112	118	132	118	114

5.2.3 Untersuchung der Regenerationsfähigkeit der Flechten nach HCl-Begasung

sieht man von der ständigen, wenn auch in ihrer Konzentration schwankenden CO_2 -Belastung ab, der die Organismen fast in der ganzen Welt ausgesetzt sind, so treten HCl-Immissionen nicht nur örtlich begrenzt, sondern auch nur stoßweise auf. Daher gibt es auch unter den natürlichen Freilandbedingungen einen Wechsel zwischen Gasbelastungs- und Erholungsphasen.

In der nun folgenden Versuchsserie sollte geprüft werden, ob und in welchem Umfang sich der Gasstoffwechsel unserer mit HCl begasten Flechten wieder auf den Normal-Pegel einspielt, wenn eine 10 tägige Erholung in praktisch immissionsfreier Luft gegeben wird. Zu diesem Zweck wurden die 6 Tage lang begasten Thalli anschließend für 10 Tage im Schifferberger Wald bei Gießen aufgehangen und danach die Atmung und die Photosynthese bestimmt.

In Abbildung 26 und Tabelle 7 sind die Atmungswerte der Testflechten vor und nach der HCl-Begasung sowie nach 10 tägigem Verbleiben in schadgasfreier Außenluft dargestellt. Es wird deutlich, daß bei *I. saxatilis* eine Erholung stattfand. Diese führte zwar nicht ganz bis zur Respirationshöhe der Kontrolle, jedoch war die Rekreation doch so ausgeprägt, daß sich fast die gleiche Atmungsintensität wie vor Begasungsbeginn ergab.

Für alle anderen Flechtenarten fiel nach dem Abbruch der Begasung die Atmung ab. Die Depression war gering bei *X. parietina* und *C. glauca*, deutlich bei *I. sulcata* und *H. phy-*

sodes, stark bei *P. furfuracea*.

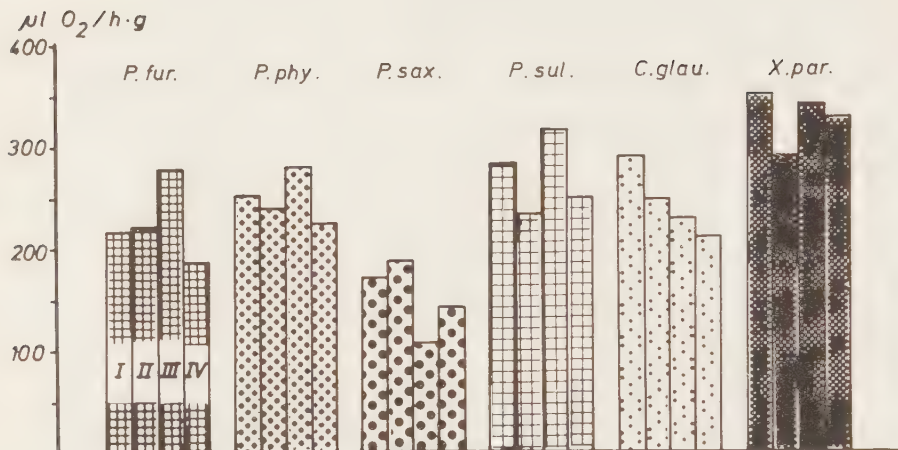


Abb. 26: Atmung von 6 verschiedenen Flechtenarten nach 6 tägiger Begasung mit 0,2 ppm HCl und 10 tägiger Erholung

I : Kontrolle nach 6 Tagen

II : Kontrolle nach 10 Tagen Erholung

III : begast nach 6 Tagen

IV : 6 Tage begast, anschließend 10 Tage Erholung

In Abbildung 27 und Tabelle 7 sind die Werte der reellen Photosynthese vor und nach der HCl-Begasung und nach Erholung angegeben. *P. saxatilis* zeigte eine weitgehende und *P. furfuracea* eine deutliche Erholung nach 10 tägigem Freilandaufenthalt. Nur bei *C. glauca* konnte kein erneutes Ansteigen der reellen Photosynthese nachgewiesen werden. Hier lagen die Werte nach 10 Tagen Erholung sogar unter dem unmittelbar nach der Begasung mit HCl gemessenen Wert. Bei den Flechten, die unter HCl-Einwirkung mit einem Anstieg der reellen Photosynthese reagierten, konnte nach dem Aufenthalt

im Freiland ein erneutes Absinken der Werte bis etwa auf den Ausgangswert beobachtet werden.

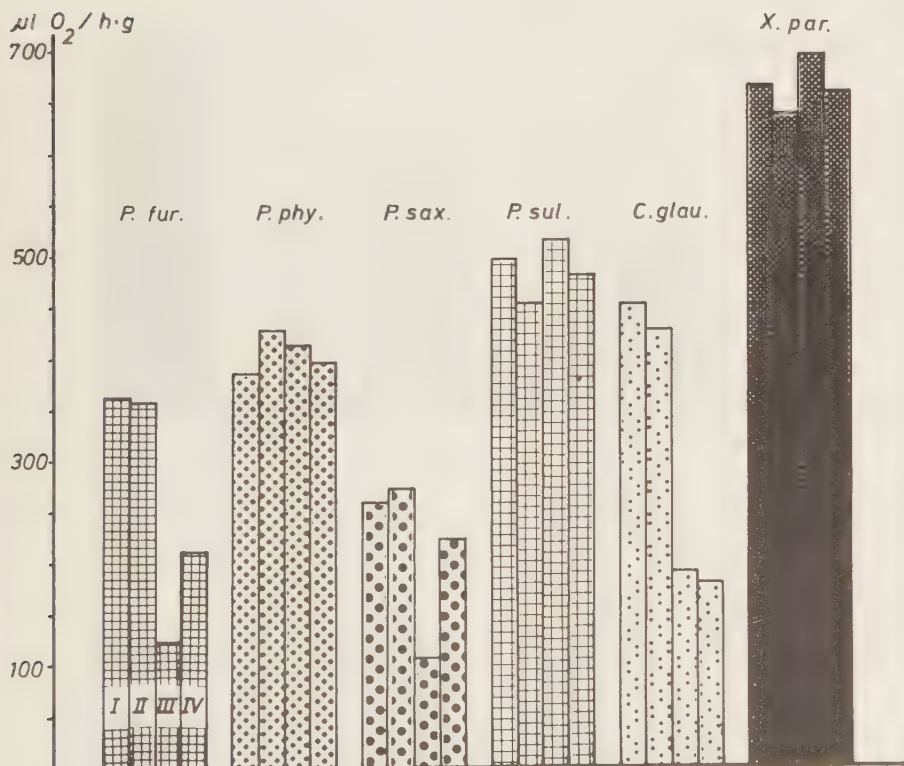


Abb. 27: Reelle Photosynthese von 6 verschiedenen Flechtenarten nach 6 tägiger Begasung mit 0,2 ppm HCl und 10 tägiger Erholung

Die apparente Photosynthese (Abbildung 28 und Tabelle 7) wurde bei allen Kontrollflechten außer *P. furfuracea* durch den Wechsel von der Gewächshausluft zur Freilandluft stimuliert. Bei den begasten Thalli war besonders auffällig die gute Erholung von *P. furfuracea*. Hier war die apparente Photosynthese unter HCl-Einfluß völlig zusammengebrochen.

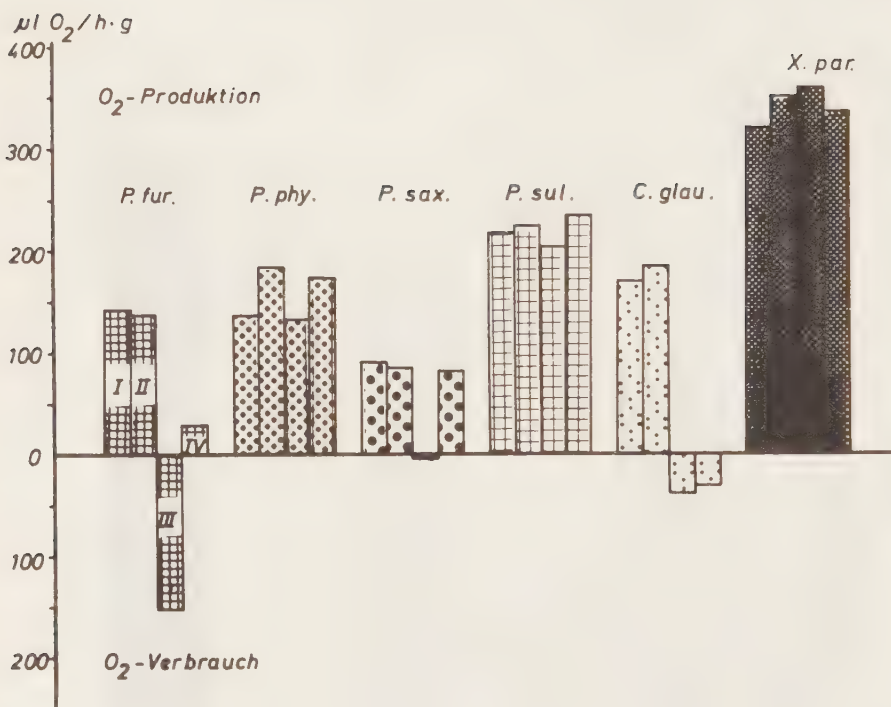


Abb. 28: Apparente Photosynthese von 6 verschiedenen Flechtenarten nach 6 tägiger Begasung mit 0.2 ppm HCl und 10 tägiger Erholung

Nach 10 tägiger Begasungspause konnte bei Belichtung wieder eine O_2 -Entwicklung gemessen werden. Auch bei P. saxatilis ergaben sich nach Aufhören der Begasung wieder positive Werte der apparenten Photosynthese.

C. glauca war die einzige Flechtenart, die auch nach der Erholung keine apparente Photosynthese mehr zeigte. Damit blieb hier die O_2 -Bilanz negativ.

Tab. 7: Relativwerte des Gaswechsels von 6 Flechtenarten nach 6 tägiger Begasung mit 0,2 ppm HCl und 10 tägiger Erholung (Ausgangswert = 100 %) 20

Art	Atmung				keelle Photosynthese				apparente Photosynthese			
	Kontrolle		begast		Kontrolle		begast		Kontrolle		begast	
	6Tage	16Tage	6Tage	16Tage	6Tage	16Tage	6Tage	16Tage	6Tage	16Tage	6Tage	16Tage
<i>Pseudovernia furfuracea</i>	85	86	109	75	86	85	30	51	87	83	-93	18
<i>-ypocymnia physodes</i>	108	105	120	97	102	114	110	105	95	128	93	119
<i>Larmelia saxatilis</i>	115	126	73	97	101	107	42	88	84	74	-3	75
<i>Larmelia sulcata</i>	83	69	53	73	96	73	99	92	118	121	109	127
<i>Lecanaria glauca</i>	105	90	83	77	110	104	47	44	120	134	-27	-21
<i>Xanthoria parietina</i>	99	81	97	92	107	102	112	106	118	130	132	125

5.3 Expositionsversuch zur Ermittlung von HF-Wirkungen

5.3.1 Gaswechsellmessungen

Um die Wirkung fluoridhaltiger Emissionen auf die Flechten zu untersuchen, wurden Proben von 6 verschiedenen Flechtenarten für 28 Tage in der Umgebung einer Glashütte bei Limburg exponiert. Daß an diesem Standort Fluorwasserstoff in gegenüber anderen Schadgasen relativ hohen Konzentrationen auftritt, zeigen die Untersuchungen von GWINNER (unveröffentlicht 1974). Der Einfluß von Fluorid wurde als Freilandversuch durchgeführt, da eine apparative Ausstattung für eine HF-Begasung nicht zur Verfügung stand.

Unmittelbar vor Versuchsbeginn wurden Photosynthese, Respiration und Chlorophyllgehalt des Testmaterials bestimmt. Die Flechten wurden an 4 Standorten, die 50 (Station I), 200 (Station II), 600 (Station III) und 1600 m (Station IV) vom Emittenten entfernt lagen, aufgehangen.

Die Respiration der Flechte *P.furfuracea* (Abb. 29) zeigte

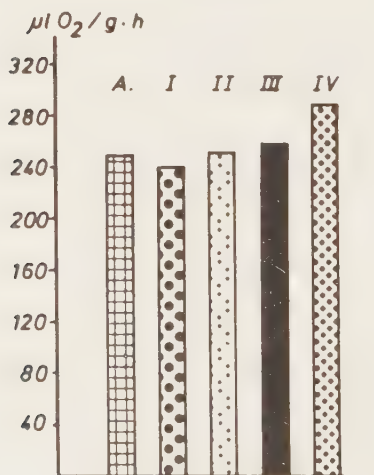


Abb. 29:

Atmung von *P.furfuracea*
nach 28 tägiger Exposition
in versch. Entfernung
zur Glashütte Lim-
burg

-  = Ausgangswert
 = Station I
 = Station II
 = Station III
 = Station IV

sich nach 28 Tagen bei allen Stationen gegenüber dem Ausgangswert weitgehend unverändert.

Bei H. physodes dagegen ergab sich ein Anstieg der Dunkel-
atmung bei den Stationen I-III, die 50-600 m. vom Emittenten
entfernt lagen (Abb. 30).

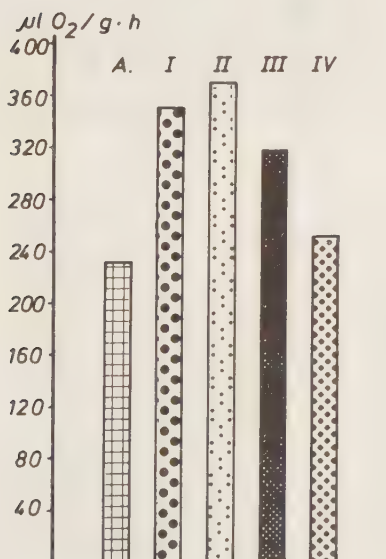


Abb. 30:

Atmung von H. physodes
nach 28 tägiger Exposi-
tion in versch. Entfer-
nung zur Glashütte Lim-
burg

F. saxatilis (Abb. 31) zeigte eine geringe Stimulatioñ
der Respiration nur bei Station I, während die Werte der
übrigen Stationen innerhalb der Schwankungsbreite des Ver-

suchsmaterials lagen.

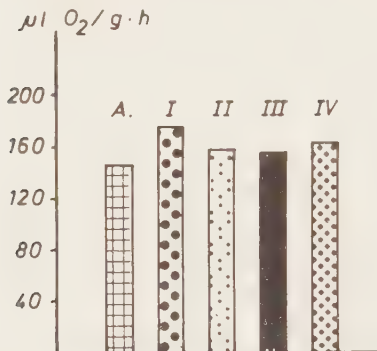


Abb. 31:

Atmung von *P. saxatilis* nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung zur Glashütte Limburg

Bei *P. sulcata* (Abb. 32) ließen sich bis auf ein leichtes Absinken der Werte von Station II und III ebenfalls keine charakteristischen Veränderungen der Dunkelatmung feststellen, während bei *C. glauca* (Abb. 33) bei den Stationen I und II eine Stimulation der Respiration beobachtet werden konnte.

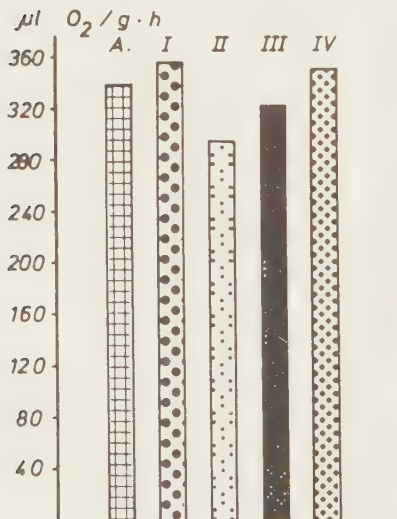


Abb. 32:

Atmung von *P. sulcata* nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung zur Glashütte Limburg

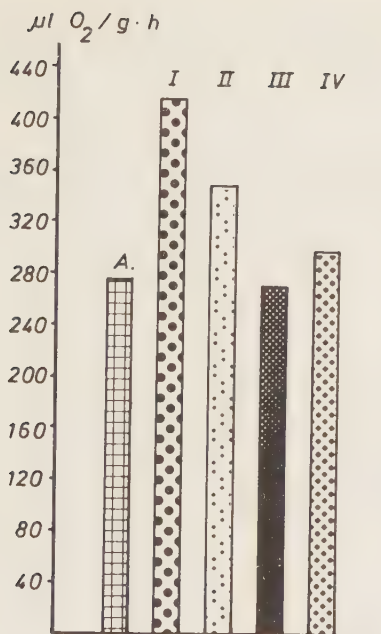


Abb. 33:

Atmung von *C. glauca* nach
28 tägiger Exposition in
versch. Entfernung zur
Glashütte Limburg

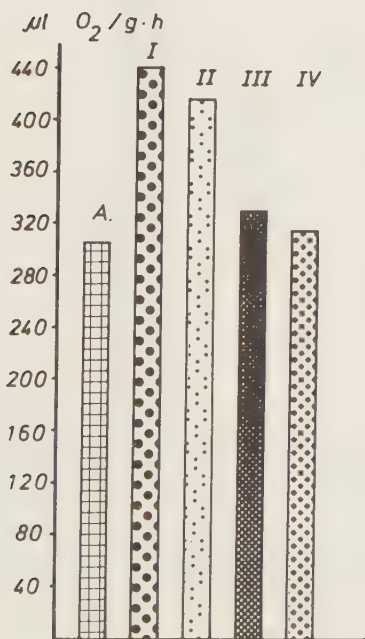


Abb. 34:

Atmung von *X. parietina*
nach 28 tägiger Exposition
in versch. Entfernung zur
Glashütte Limburg

Bei A. parietina (Abb. 34) konnte mit zunehmender Annäherung an den Emittenten eine Steigerung der Dunkelatmung festgestellt werden.

Auch die Darstellung der Relativwerte in Tabelle 8 zeigt, daß bei keiner der untersuchten Flechtenarten unter der Einwirkung der fluoridhaltigen Emissionen ein Abfall der Dunkelatmung erfolgte.

Bei P. furfuracea zeigten die Werte der reellen Photosynthese die Empfindlichkeit dieser Flechte gegenüber fluoridhaltigen Emissionen (Abb. 35). Bei den Stationen I- III ergaben sich negative bzw. knapp über dem Nullpunkt liegende Werte. Nur bei den an Station I exponierten Flechten

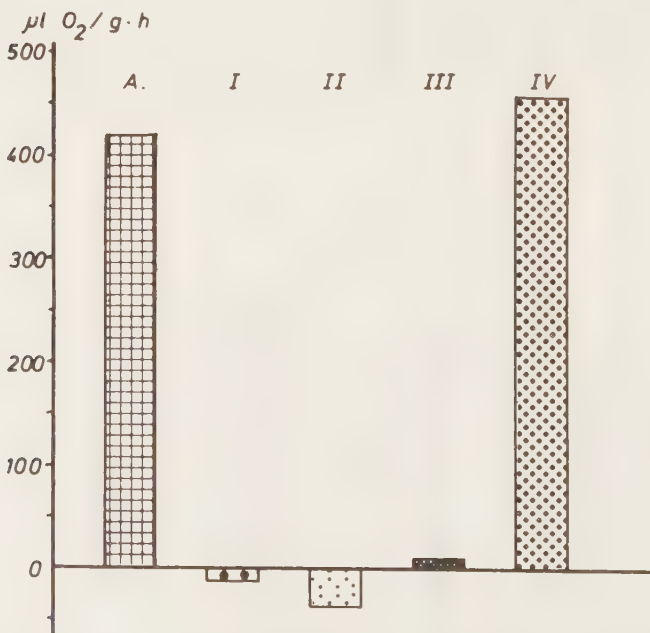


Abb. 35: Reelle Photosynthese von P. furfuracea nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung zur Glashütte Limburg

konnte eine gegenüber dem Ausgangswert unveränderte reelle Photosynthese ermittelt werden.

Die Thalli von H. physodes (Abb. 36) zeigten bei den 1500 und 600 m vom Emittenten entfernten Standorten eine leichte Stimulation der reellen Photosynthese, während mit zunehmender Annäherung an die Glashütte eine Depression feststellbar war.

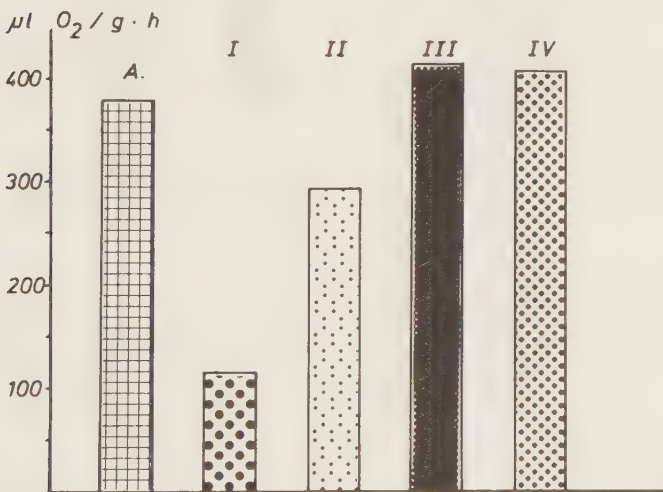


Abb. 36: Reelle Photosynthese von H. physodes nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung zur Glashütte Limburg

Bei H. saxatilis (Abb. 37) konnte bei Station IV keine Depression gegenüber dem Ausgangswert beobachtet werden. Bei den in geringerer Entfernung zum Emittenten exponierten Flechten ergab sich ein deutlicher Abfall der reellen Photosynthese. Die stärkste Depression wiesen die Thalli der

Station II auf.

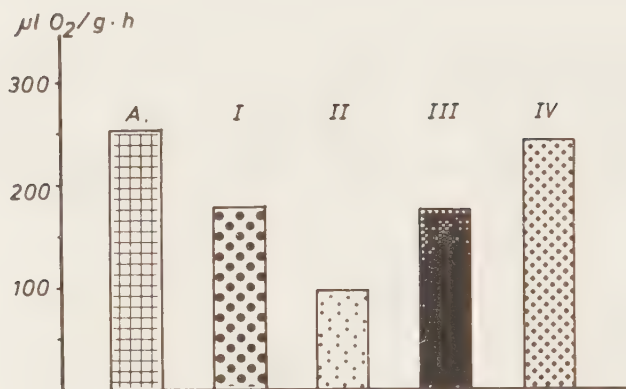


Abb. 37: Reelle Photosynthese von *F. saxatilis* nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung zur Glashütte Limburg

Die Proben von *F. sulcata* (Abb. 38) zeigten mit zunehmender Annäherung an den Emittenten einen gleichmäßigen Abfall der reellen Photosynthese.

Bei *C. glauca* (Abb. 39) konnte bei Station IV eine leichte Stimulation der reellen Photosynthese festgestellt werden. Die an Station III exponierten Thalli zeigten eine starke Depression der reellen Photosynthese, jedoch stiegen die Werte mit zunehmender Annäherung an die Glashütte wieder leicht an.

X. parietina (Abb. 40) erwies sich am unempfindlichsten gegenüber Fluorid. Die unmittelbar neben der Glashütte exponierten Thalli zeigten den höchsten Wert der reellen Photosynthese. Auch die Werte der von den übrigen Standor-

ten stammenden Flechten zeigten gegenüber dem Ausgangswert stimulierte reelle Photosynthese.

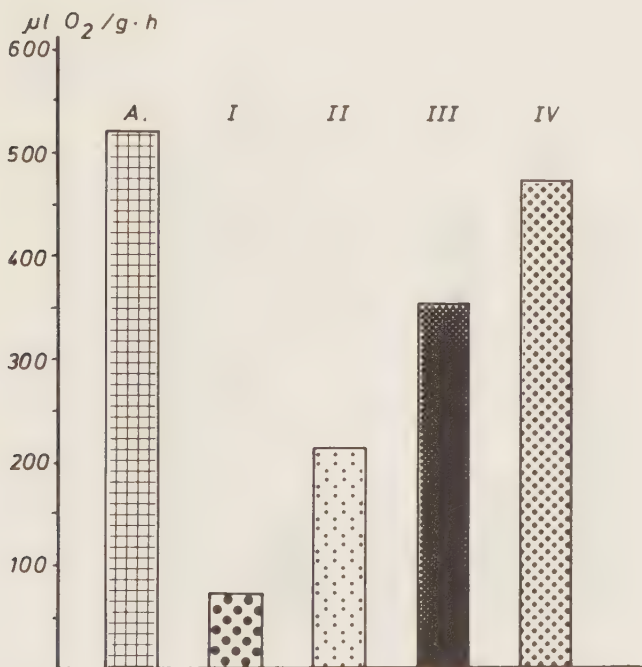


Abb 38: Reelle Photosynthese von *P. sulcata* nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung zur Glashütte Limburg.

Die in Tabelle 8 dargestellten relativen Werte der realen Photosynthese zeigen erneut die Empfindlichkeit der Flechten *P. furfuracea*, *C. glauca*, *P. saxatilis*, *H. physodes* und *P. sulcata*, während *X. parietina* sich als weitgehend unempfindlich gegenüber den Emissionen der Glashütte erwies.

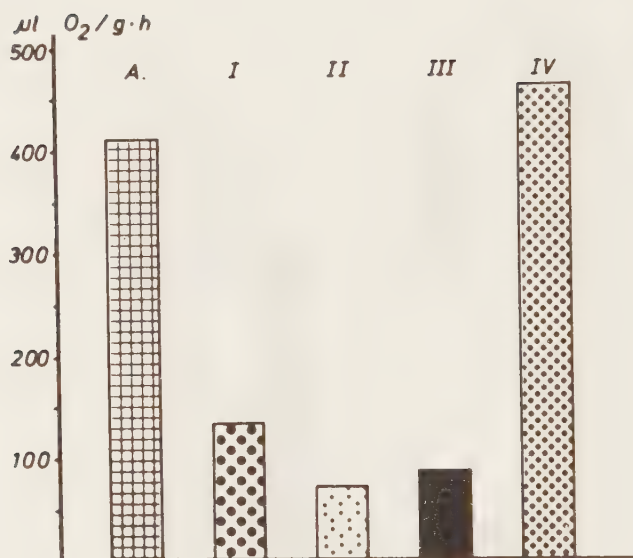


Abb. 39: Reelle Photothosynthese von *C. glauca* nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung zur Glashütte Limburg

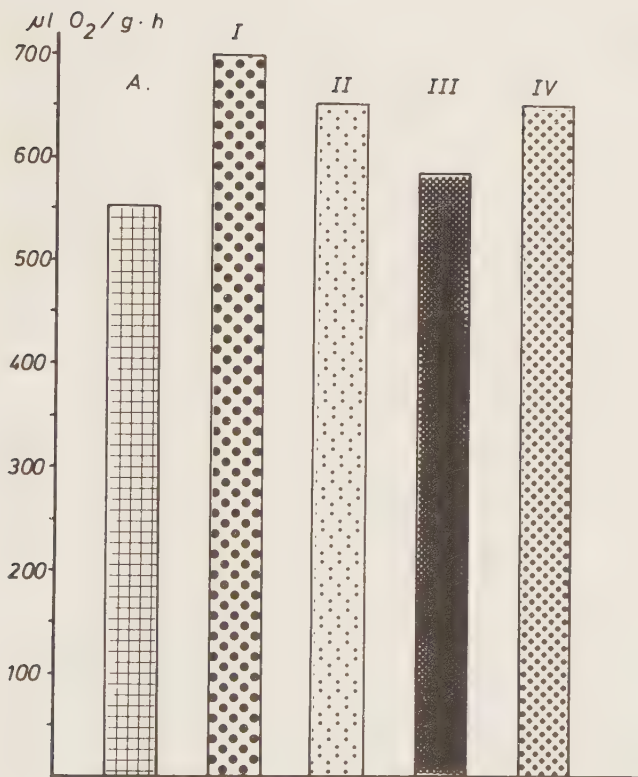


Abb. 40: Reelle Photosynthese von *X. parietina* nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung zur Glashütte Limburg

Tab. VI: Relativwerte des Gaswechsels von 6 Flechtenarten nach 28 tägiger Exposition in versch.
Entfernung zur Glashütte Limburg (Ausgangswert = 100 %))

Art	Atmung				Reelle Photosynthese			
	Station I	Station II	Station III	Station IV	Station I	Station II	Station III	Station IV
<i>Pseudevernia furfuracea</i>	94	100	101	112	- 3	- 8	2	108
<i>Hypogymnia physodes</i>	151	159	136	107	30	78	110	108
<i>Parmelia saxatilis</i>	119	106	105	109	68	38	68	93
<i>Parmelia sulcata</i>	107	87	95	104	14	41	67	91
<i>Cetraria glauca</i>	150	125	98	108	33	17	21	113
<i>Xanthoria parietina</i>	144	135	121	115	126	118	105	118

Die Bestimmung der apparenten Photosynthese von F. furfuracea (Abb. 41) ergab, daß nach 28 tägiger Immissionseinwirkung die Photosynthese der Thalli der Stationen I-III völlig zum Erliegen gekommen war. Bei Belichtung konnte bei den von diesen Stationen stammenden Proben ein erheblicher O_2 -Verbrauch gemessen werden. Nur bei den Proben der 1600 m von der Glashütte entfernten Station IV zeigte die apparente Photosynthese die gleiche Intensität wie zu Versuchsbeginn.

Bei H. physodes (Abb. 42) konnte bei der Station I ebenfalls eine starke Depression der Photosynthese bis unter den Kompensationspunkt festgestellt werden. Mit zunehmender Entfernung der Standorte von der Glashütte ließen sich steigende Werte der apparenten Photosynthese messen. Die an Standort IV exponierten Thalli zeigten nach 28 Tagen sogar eine gegenüber dem Ausgangswert leicht stimulierte Photosynthese.

F. saxatilis (Abb. 43) wies die geringste photosynthetische Leistungsfähigkeit der 6 Flechtenarten auf. Nach 28 Expositionstagen zeigte sich bei Station I ein starker Abfall der apparenten Photosynthese bis zum Kompensationspunkt. Bei den Thalli der Station II konnte bei Belichtung sogar ein O_2 -Verbrauch gemessen werden. Auch die an Station III exponierten Flechten wiesen eine starke Depression der apparenten Photosynthese auf, während die O_2 -Entwicklung des Materials von Station IV noch etwa $\frac{3}{4}$ des Ausgangswertes betrug.

Bei F. sulcata (Abb. 44) fiel die apparente Photosynthese mit zunehmender Annäherung der Expositionsstandorte an den

$\mu\text{l O}_2/\text{g} \cdot \text{h}$

P. furfuracea

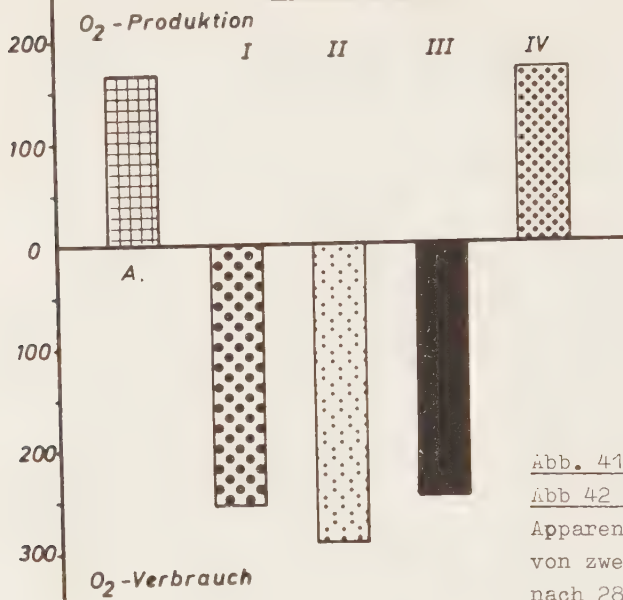


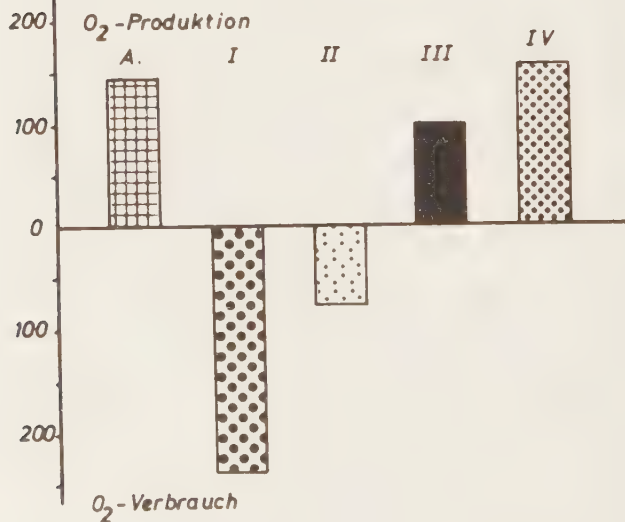
Abb. 41 oben

Abb 42 unten:

Apparente Photosynthese
von zwei Flechtenarten
nach 28 tägiger Expo-
sition in versch. Ent-
fernung zur Glashütte
Limburg

$\mu\text{l O}_2/\text{h} \cdot \text{g}$

H. physodes



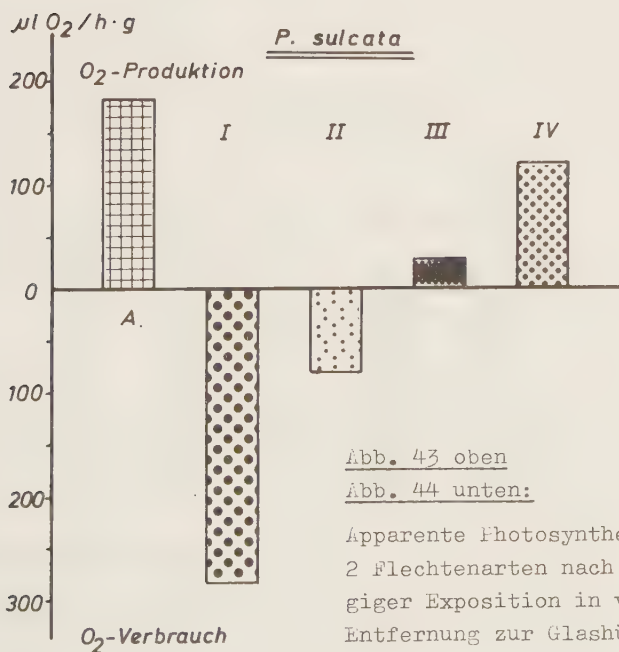
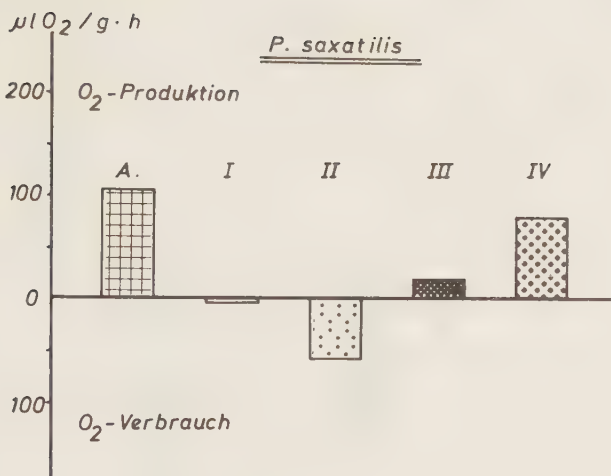


Abb. 43 oben

Abb. 44 unten:

Apparente Photosynthese von
2 Flechtenarten nach 28 t-
giger Exposition in versch.
Entfernung zur Glashütte Limburg

Emittenten immer mehr ab. Die Thalli von Station I zeigten bei Versuchsabschluß einen C_2 -Verbrauch von -285 $\mu l/h \cdot g$.

Auch C. glauca (Abb. 45) reagierte sehr empfindlich auf die Immissionen der Glashütte. Nach 28 Tagen war bei den Stationen I-III eine Depression der apparenten Photosynthese bis weit unter den Kompensationspunkt zu beobachten, während ähnlich wie bei H. physodes die Thalli von Station IV eine leicht stimulierte CO_2 -Assimilation zeigten.

Die Flechte X. parietina (Abb. 46) erwies sich als die unempfindlichste der 6 untersuchten Flechtenarten. Nach einer Expositionszeit von 28 Tagen ließ sich bei den Stationen I+II sogar ein leichter Anstieg der Werte beobachten.

In Tabelle 10 sind die Relativwerte der apparenten Photosynthese dargestellt. Am empfindlichsten reagierten demnach die beiden Flechten C. glauca und P. furfuracea. Auch P. saxatilis, H. physodes und P. sulcata zeigten bei den Stationen I und II eine Depression der apparenten Photosynthese bis knapp über oder erheblich unter den Kompensationspunkt. Im Gegensatz dazu erwies sich X. parietina als gegen die Immissionen der Glashütte weitgehend unempfindlich.

5.3.2 Chlorophyllgehalt

Der Chlorophyllgehalt von P. furfuracea (Tabelle 9) erwies sich bei Station IV gegenüber dem Ausgangswert kaum verändert. Jedoch in den Thalli, die an den Stationen I-III exponiert waren, konnte mit der benutzten Bestimmungsmethode kein Chlorophyll mehr nachgewiesen werden.

Bei H. physodes ergab sich bei den von Station IV stammenden

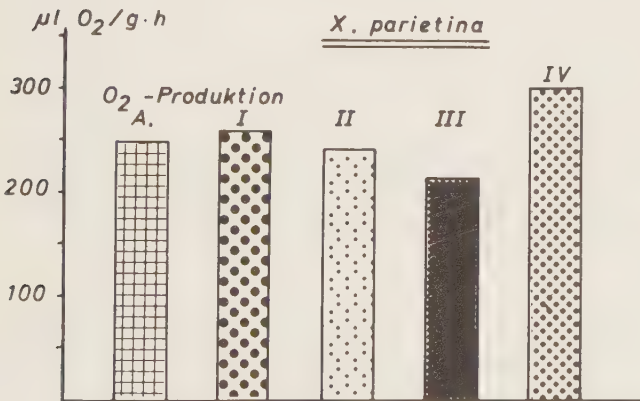
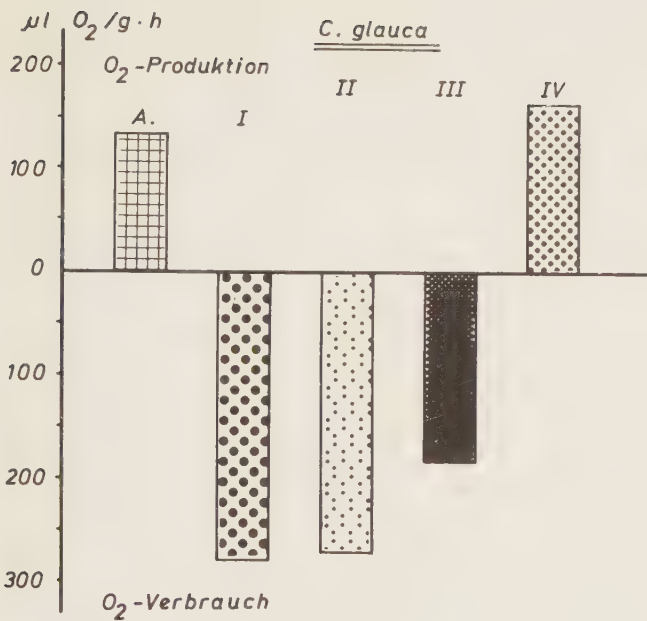


Abb. 45 oben und Abb. 46 unten:

Apparente Photosynthese von 2 Flechtenarten nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung von der Glashütte Limburg

Tab. 9: Chlorophyllgehalt von 6 Flechtenarten nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung von der Glashütte Limburg
mg Chlorophyll/g lufttr. Substanz

Art	Ausgangs- wert	Stat. I	Stat. II	Stat. III	Stat. IV
<i>Pseudevernia furfuracea</i>	0,94	0	0	0	0,96
<i>Hypogymnia physodes</i>	0,88	0,21	0,64	0,74	0,95
<i>Parmelia saxatilis</i>	0,53	0,20	0,23	0,53	0,45
<i>Parmelia sulcata</i>	1,56	0,35	0,59	0,64	1,46
<i>Cetraria glauca</i>	1,66	0,18	0,16	0,33	1,58
<i>Xanthoria parietina</i>	1,96	1,95	1,87	2,01	2,00

den Thalli mit 0,95 mg Chlorophyll/g gegenüber dem Ausgangswert von 0,88 mg/g ein leichter Anstieg des Pigmentgehaltes. Mit zunehmender Annäherung der Expositionsstandorte an die Glashütte konnte jedoch ein zunehmender Chlorophyllschwund der Thalli beobachtet werden.

Die Flechte *F. saxatilis* wies mit 0,53 mg Chlorophyll/g den geringsten Ausgangswert des Pigmentgehaltes auf. Bei den an Standort IV exponierten Flechten konnte kein wesentlicher Chlorophyllabbau nachgewiesen werden. Ebenso zeigte sich der Pigmentgehalt an Station III unverändert. Die Proben der Stationen I und II zeigten jedoch einen Chlorophyllschwund um mehr als die Hälfte.

Die Flechte L. sulcata reagierte auf die 28 tägige Exposition mit einem Chlorophyllschwund, der um so stärker war, je näher der Standort am Emittenten lag. Der Ausgangswert betrug 1,56 mg/g, der Chlorophyllgehalt der Station I nur noch 0,35 mg/g.

C. glauca zeigte neben P. furfuracea den stärksten Chlorophyllabbau. Der Chlorophyllgehalt der Thalli sank von 1,66 mg/g (Ausgangswert) bis auf 0,16 mg/g bei Station II, was einem Chlorophyllabbau von rund 90 % entspricht.

X. parietina, die sich hinsichtlich der Photosynthese als unempfindlich gegen HF erwies, zeigte auch im Chlorophyllgehalt keine Abnahme unter dem Einfluß von Fluorid. Die bei den Stationen I-IV gemessenen Chlorophyllgehalte lagen innerhalb der Schwankungsbreite des Versuchsmaterials. Das Ausgangsmaterial von X. parietina hatte mit 1,96 mg Chlorophyll/g von allen 6 Flechtenarten den höchsten Pigmentgehalt.

In Tabelle 10 sind die Relativwerte für den Chlorophyllgehalt der 6 Flechtenspecies aufgeführt.

5.3.3 Fluoridgehalt

Die Bestimmung des Fluoridgehaltes vor Beginn der Exposition ergab bei den 6 Flechtenarten Werte zwischen 0,7 und 5,0 mg F/100 g. P. furfuracea wies vor Versuchsbeginn den geringsten Fluoridgehalt auf. Nach 28 Tagen zeigten die Thalli aller 4 Standorte eine erhebliche Zunahme des Fluoridgehaltes. Mit zunehmender Annäherung der Standorte an den Emittenten konnte ein steigender Fluoridgehalt fest-

Tab. 1c: relative der apparenten Photosynthese und des Chlorophyllgehaltes von 6 Flechtenarten nach 28 tägiger Exposition in versch. Entfernung zur Glashütte Limburg
(Ausgangswert = 100 %)

Art	apparente Photosynthese				Chlorophyllgehalt			
	Station I	Station II	Station III	Station IV	Station I	Station II	Station III	Station IV
<i>Pseudovernia furfuracea</i>	- 154	- 177	- 150	102	0	0	0	102
<i>Hypogymnia physodes</i>	- 166	- 54	68	108	23	73	84	108
<i>Larmelia saxatilis</i>	0	- 55	17	74	37	43	100	85
<i>Larmelia sulcata</i>	- 154	- 44	16	67	22	37	40	93
<i>Cetraria glauca</i>	- 205	- 200	- 134	122	11	10	20	96
<i>Xanthoria parietina</i>	104	97	86	121	99	95	102	102

Tab. 11: Fluorgehalt von 6 Flechtenarten nach 28 tägiger
Exposition in versch. Entfernung von der Glashütte
Limburg

absolute werte: mg F/ 100 g lufttr. Substanz

Relativwerte: Ausgangsmaterial = 100 %

Art	Aus- gangs- wert	Stat. I	Stat. II	Stat. III	Stat. IV
Pseudevernia furfuracea	0,7 =100 %	4,3 610	3,9 555	3,0 430	1,8 260
Hypogymnia physodes	3,1 =100 %	19,5 616	13,3 430	13,7 442	6,0 194
Parmelia saxatilis	4,3 =100 %	16,0 372	17,3 400	14,3 332	12,3 288
Parmelia sulcata	3,2 =100 %	21,2 694	10,6 331	10,6 331	7,4 231
Cetraria glauca	1,5 =100 %	10,1 673	4,9 326	5,7 380	4,1 273
Xanthoria parietina	5,0 =100 %	16,7 334	10,4 208	11,7 234	6,4 128

gestellt werden.

Die Proben von H. physodes (Tabelle 11) wiesen an Standort I mit 19,5 mg F/100 g den höchsten Fluoridgehalt auf. Selbst der Fluoridgehalt des am weitesten von der Glashütte entfernten Standortes IV war mit 6,0 mg F/100 g gegenüber dem Ausgangswert verdoppelt.

F. saxatilis hatte vor Versuchsbeginn einen F-Gehalt von 4,3 mg F/100 g. Hier zeigten die an Standort II exponierten Thalli mit 17,3 mg F/100 g die höchste Fluoridanreicherung.

Bei F. sulcata wiesen die von Station I stammenden Thalli mit 21,2 mg F/100 g den höchsten Fluoridgehalt auf. Gegenüber dem Ausgangswert bedeutete dies eine Steigerung um etwa das Siebenfache. Gleichzeitig war es der höchste Wert, der bei allen 6 Species nach 28 Tagen Exposition gemessen wurde.

C. glauca hatte mit 1,5 mg F/100 g nach C. furfuracea den geringsten Fluoridgehalt im Ausgangsmaterial. Nach Versuchsabschluß ergab sich in den an Standort I exponierten Proben ebenfalls ein stark erhöhter Fluoridgehalt von 10,1 mg F/100 g.

Bei X. parietina, die mit 5,0 mg F/100 g den höchsten Fluoridgehalt im Ausgangsmaterial aufwies, führte eine 28 tägige Exposition in einer Entfernung von 50 m zum Emittenten zu einer Verdreifachung des Fluoridgehaltes.

Die in Tabelle 11 ebenfalls dargestellten, auf den Ausgangswert bezogenen relativen Werte des Fluoridgehaltes der 6 Flechtenarten zeigen, daß an allen Stationen und bei allen Flechtenarten eine Zunahme des Fluoridgehaltes nachzuweisen war.

Diskussion

Ziel der durchgeführten Versuche war, die Wirkung wichtiger Schadgase bei niedriger, jedoch mehrwöchig konstanter Konzentration auf Flechten zu untersuchen. Es wurden 7 Flechtenarten geprüft, um aus einer aufzustellenden Reihenfolge der Empfindlichkeit die Arten herauszusuchen, die sich am besten als Indikatoren zur Erfassung von Grenzwerten der Schadgaskonzentrationen eignen.

Von besonderem Interesse erscheint die Frage, welcher der beiden Partner der Flechte, Alge oder Pilz, zuerst bzw. empfindlicher von der Schädigung betroffen wird. Um dies zu untersuchen, wurden sowohl Photosynthese- als auch Respirationmessungen durchgeführt. Zum weiteren Nachweis von Schädigungen, die am Assimilationsapparat des Algenpartners stattfinden, wurde der Chlorophyllgehalt der Flechten bestimmt. Mittels Bonitierungen der äußerlich sichtbaren Schädigung bei Schadgaseinwirkung sollte geprüft werden, ob eine Parallelität zwischen Vitalitätsminderung und Farbveränderung besteht.

Nach Begasung mit $0,9 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ durchgeführte Gaswechselmessungen zeigen in Übereinstimmung mit anderen Untersuchungen, daß die Intensität der Photosynthese unter der Einwirkung dieses Schadgases vermindert wird (VILLWOCK 1959, FLARSON und SKYE 1965, DÄSSLER und RAFT 1969, BÜRTTZ und RAFT 1972, SHOHAN 1972). Benutzt man den Zeitpunkt, an dem der Kompensationspunkt der C-Assimilation unterschritten wird, als Maß für die Empfindlichkeit der Flechten gegenüber SO_2 , so ergibt sich für die 7 untersuch-

ten Species folgende Rangfolge:

	Begasungs- zeit	Art	abnehmende Empfind- lichkeit
Kompensa- tionspunkt unter- schritten	nach 7 Tagen	<i>I. caperata</i> <i>C. glauca</i>	
	nach 14 Tagen	<i>H. physodes</i> <i>P. furfuracea</i>	
	nach 21 Tagen	<i>P. saxatilis</i> <i>P. sulcata</i>	
	-	<i>X. parietina</i>	

P. caperata und *C. glauca* zeigen mithin bereits nach 7 Tagen eine starke Depression der Photosynthese und damit die größte Empfindlichkeit des Assimilationsapparates. Während *H. physodes* und *P. furfuracea* ebenfalls empfindlich reagieren und *P. saxatilis* und *P. sulcata* eine mittlere Empfindlichkeit aufweisen, scheint *X. parietina* gegen SO_2 -Einwirkung wesentlich unempfindlicher zu sein.

Legt man der Einstufung nach der Empfindlichkeit des Assimilationsapparates der Flechten die Photosyntheseintensität nach 28 Begasungstagen zugrunde, so ergibt sich ein verändertes Bild, da sich nun *P. furfuracea* und *H. physodes* als sehr empfindlich erweisen. Demgegenüber zeigen *C. glauca*, *I. caperata*, *P. sulcata* und *P. saxatilis* eine mittlere Empfindlichkeit. Am wenigsten sensibel scheint wiederum *X. parietina* zu sein. (Tab. 12). Diese Toxizitätsabstufung entspricht auch den Freilandbefunden (STEUBING, KLEE, KIRSCHBAUM 1974).

Nach den Untersuchungen von RAO und LE BLANC (1966) ist zu erwarten, daß die Schädigung des Assimilationsapparates mit

Tab. 12: Empfindlichkeitsstufen von Flechten bei 28 tägiger Begasung mit 0,9 mg SO₂ pro m² und bei 6 tägiger Begasung mit 0, 2 ppm HCl

	SO ₂			HCl		
	äußerliche Schädigung	Chlorophyll-gehalt	apparente Photosynthese	äußerliche Schädigung	Chlorophyll-gehalt	apparente Photosynthese
empfindlich-keitsstufen						
sehr empfindlich	F. caperata P. furfuracea	C. glauca P. furfuracea F. caperata	P. furfuracea H. physodes		F. saxatilis	P. furfuracea
empfindlich	H. physodes C. glauca I. sulcata	F. saxatilis I. sulcata H. physodes	F. saxatilis I. sulcata P. caperata C. glauca		C. glauca I. saxatilis	
weniger empfindlich	F. saxatilis X. parietina	X. parietina	X. parietina	P. furfur. H. physodes I. saxatili I. sulcata C. glauca X. pariet.	P. furfur. H. physodes I. sulcata C. glauca X. parietina	H. physodes I. sulcata X. parietina

einer Chlorophyllzerstörung der Alge verbunden ist. Aus den Bestimmungen geht bei allen 7 Flechtenarten ein Abbau des Chlorophylls unter dem Einfluß von SO_2 hervor. Zu ähnlichen Ergebnissen sind bereits RAO und LE BLANC (1965), COLEMAN (1967), KILLE (1969) und FUCKETT et al. (1973) gekommen. Der Pigmentabbau scheint aber langsamer vor sich zu gehen, als die Depression der apparenten Photosynthese (vergl. Tab. 1 und 4).

Die nach 28 tägiger Begasung gemessenen Werte ergeben eine deutliche Reihung der Empfindlichkeit bei den 7 Flechtenarten. *C. glauca*, *P. furfuracea* und *I. caperata* erweisen sich als sehr empfindlich, *P. saxatilis*, *P. sulcata* und *H. physodes* als empfindlich und *X. parietina* als weniger empfindlich (Tab. 12).

Kriterien für die Empfindlichkeitseinstufung von Flechten nach ihrer Sensibilität:

	äußerlich sichtbare Schädigung %	Gesamtchlorophyllgehalt % des Ausgangswertes	apparente Photosynthese % des Ausgangswertes
sehr empfindlich	+71 - +100	0 - + 33	-60 und mehr
empfindlich	+31 - + 70	+34 - + 66	+20 - -59
weniger empfindlich	0 - + 30	+67 - +100	+21 - +100

Vergleicht man die aus den Assimilationsmessungen gewonnene Rangfolge der Flechten nach ihrer Sensibilität mit der aus der Chlorophyllgehaltsbestimmung ermittelten, so ergibt sich für *P. furfuracea*, *I. saxatilis*, *P. sulcata* und *X. parietina* eine Übereinstimmung nach beiden Methoden. Lediglich *H. physodes* zeigt trotz Empfindlichkeit der Photosynthese einen geringeren Chlorophyllabbau. Bei *C. glauca* und *P. caperata*

ist dagegen die relative Chlorophyllzerstörung stärker als die Depression der Photosynthese.

Nicht nur zur Bestimmung der Rangfolge der Toxikoleranz schließlich noch die äußerlich sichtbare Schädigung heran (Tab.12), so zeigt sich, daß hier *P. caperata* (100 % Schädigungsgrad) und *P. furfuracea* (70-90 %) als sehr empfindlich, *H. physodes* (50-70 %), *C. glauca* (50-70 %) und *P. sulcata* (30-50 %) als empfindlich und *P. saxatilis* (10-30 %) und *X. parietina* (0 %) als weniger empfindlich einzustufen sind.

Eine für biologische Tests geeignete Flechte müßte in ihrer äußeren Schädigung die morphologischen und physiologischen Veränderungen widerspiegeln, um dadurch das Erkennen von Schadgaswirkungen zu erleichtern. Für das Schadgas SO_2 erweist sich in diesem Fall *P. furfuracea* als besonders geeignet, da bei dieser Flechte die Einordnung in die Rangfolge der Sensibilität nach allen drei gewählten Methoden übereinstimmt. Eine übereinstimmende Einstufung ergibt sich ebenfalls bei *P. sulcata*, die als empfindlich und *X. parietina*, die als weniger empfindlich angesehen werden können.

Auch bei den Untersuchungen von BÖRTITZ und RANFT (1972) nimmt *P. furfuracea* eine obere Stufe in der Empfindlichkeitsrangfolge ein. JURGING (1972) berichtet ebenfalls von der großen Empfindlichkeit von *P. caperata* und *H. physodes*, während er bei *P. sulcata* und *X. parietina* gegenüber SO_2 eine relativ große Widerstandsfähigkeit konstatierte. KIRSCHBAUM (1972) fand, daß Flechten bei SO_2 -Mittelwerten über 0.10 mg/m^3 nicht mehr existieren. Mit abnehmenden SO_2 -Konzentrationen werden Artenzahl, Deckungsgrad und Vitalität erhöht. SEITZ (1972) gibt für die Grenze der Flechtenwüste von Saarbrücken

mittlere SO_2 -Konzentrationen von 0,06-0,09 mg/m^3 Luft an.

Die angeführten Ergebnisse sprechen für die Empfindlichkeit des Assimilationsapparates der chlorophyllführenden Algen der Flechten gegenüber SO_2 . Die an der Dunkelatmung mitbeteiligten Pilze scheinen nicht so eindeutig auf dieses Schadgas zu reagieren. Nur bei *C. glauca* und *P. caperata* ergibt sich von Versuchsbeginn an ein Abfall der Respiration, während bei den übrigen Flechtenarten eher eine Stimulation der Dunkelatmung unter dem Einfluß von SO_2 festgestellt werden kann (vergl. Tab. 2). Diese Beobachtungen stimmen mit den Feststellungen von SCHÜBERT und FRITSCH (1965) überein.

Die Frage nach der besonderen Wirkung von SO_2 auf die Alge oder den Pilz müßte in weiteren Versuchen geklärt werden, bei denen Phyco- und Mycobionten getrennt diesem Schadgas ausgesetzt werden. Aus Arbeiten mit den isolierten Symbiosepartnern (SHOWMAN 1972) lassen sich bisher keine eindeutigen Schlüsse ziehen, da die Kulturbedingungen stark modifizierend wirken.

Die Ergebnisse der Bestimmungen des Schwefelgehaltes der Flechten unter dem Einfluß der SO_2 -Begasung stehen in gewissem Widerspruch zu den Angaben in der Literatur, in denen stets über einen Anstieg des Schwefelgehaltes der Thalli bei Einwirkung von SO_2 berichtet wurde (GILBERT 1965, RAO und LE BLANC 1965, KLEE 1969). Im Gegensatz dazu kann bei dem vorliegenden Begasungsexperiment kein derart starker Anstieg des S-Gehaltes beobachtet werden, wie er beispielsweise von GILBERT (1965) beschrieben wurde. Bei *P. sulcata*, *P. saxatilis* und *P. furfuracea* zeigt sich der Gesamtschwefel gegenüber dem Ausgangswert nur leicht erhöht, bei *H. physodes* ist er

gleichgeblieben und bei *X. parietina*, *P. caperata* und *C. glauca* ist er sogar abgefallen (vergl. Tab. 5). Eine teilweise Erklärung für diese Beobachtung kann in den Ergebnissen der Trennung der Schwefelfractionen gesehen werden. Es zeigt sich, daß mit Ausnahme von *C. glauca* alle Flechten einen Anstieg des Gehaltes an organisch gebundenem Schwefel aufweisen, während der Gehalt an anorganisch gebundenem Schwefel im allgemeinen absinkt.

Nach KLEE(1969) wird das aufgenommene SO_2 zunächst zu Sulfat oxidiert und dann, einen aktiven Stoffwechsel der Flechten vorausgesetzt, in organische Verbindungen eingebaut. Die in den Begasungsschrank eingebrachten Flechten wurden jeden Tag mit destilliertem Wasser gut angefeuchtet. Es ist möglich, daß hierbei Sulfat ausgewaschen wurde, während der in organische Verbindungen eingebaute Schwefel nicht mehr gelöst werden konnte.

Bei einem Vergleich mit den Ergebnissen anderer Autoren ist außerdem zu berücksichtigen, daß in der vorliegenden Untersuchung mit sehr niedrigen Konzentrationen über einen längeren Zeitraum gearbeitet wurde. Hierbei war es vor allem schwierig, die Bedingungen im Klimaschrank so optimal einzustellen, daß die SO_2 -freie Kontrolle keine negativen Veränderungen aufwies. Dies ist wohl mit ein Grund für die bislang fehlenden Ergebnisse über langfristige Begasungen von Flechten in Begasungsschränken. Die Effekte einer kurzfristig hohen Begasung können sich wesentlich von denen einer langfristig niedrigeren (den natürlichen Verhältnissen mehr entsprechenden) Begasung unterscheiden (van HAUT 1961).

Die mit 0,2 ppm HCl durchgeführten Versuche verdeutlichen, daß auch die Einwirkung dieses Schadstoffes bereits nach kurzer Zeit zu einer starken Schädigung des Photosyntheseapparates der Flechten führt. Über die schädigende Wirkung von HCl berichtete kürzlich BALTESCHNEIDER (1972), der nach mehrtägiger HCl-Begasung einen erheblichen Chlorophyllabbau in den Flechtenthalli nachwies.

Legt man der Rangfolge der Flechten nach ihrer Sensibilität die in gleicher Weise wie bei SO_2 abgegrenzten Empfindlichkeitsstufen zugrunde, so erweist sich hinsichtlich der Photosynthese wiederum *P. furfuracea* als sehr empfindlich (Tab. 12). *C. glauca* und *P. saxatilis* zeigen ebenfalls eine starke Depression der Photosynthese und können mithin als empfindlich eingestuft werden, während *H. physodes*, *P. sulcata* und *X. parietina* als weniger empfindlich angesehen werden können.

Ähnlich wie bei der Begasung mit SO_2 scheint die Chlorophyllzerstörung dem Abfall der Photosynthese in gewissem zeitlichen Abfall zu folgen. Dies gilt auch für die Bonitierung der äußerlich sichtbaren Schädigung (Tab. 12). Es zeigt sich, daß die Einwirkung von phytotoxischen Substanzen primär zu physiologischen Veränderungen im Stoffwechsel der Flechten führt, und erst zu einem späteren Zeitpunkt eine äußerlich sichtbare Schädigung auftritt.

Nach 6 tägiger Einwirkung von HCl weist keine der untersuchten Flechtenarten sichtbare Schädigungen auf, die eine Toxizitätseinstufung in den Rang empfindlich oder sehr empfindlich ermöglichte (*P. furfuracea* 10 % Schädigungsgrad, *P. sulcata* 10 %, *C. glauca* 10 %, *H. physodes* 0 %, *X. parietina* 0 %).

Trotz der infolge der kurzen Versuchszeit erforderlichen Einschränkungen erscheint auch hinsichtlich des Schadgases HCl *P. furfuracea* infolge ihrer großen Sensibilität als geeignete Testflechte. Im Gegensatz zu den SO₂-Ergebnissen scheint *P. saxatilis* auf HCl weit empfindlicher zu reagieren, da bereits nach 6 tägiger Begasung die Photosynthese vollständig zum Erliegen kommt. *H. physodes* dagegen erweist sich gegen HCl weniger empfindlich als gegen SO₂. Während diese Flechtenart bei Begasung mit SO₂ eine starke Depression der Photosynthese aufweist, läßt sich nach 6 tägiger Einwirkung von HCl kein deutlicher Abfall der C-Assimilation beobachten.

Von besonderer Wichtigkeit für immissionsbelastete Organismen ist ihre "physiologische Regenerationsfähigkeit", d.h. z.B. die allmähliche Erholung ihres assimilatorischen Apparates von der Einwirkung von Schadgasen. Für diesen Vorgang ist entscheidend, ob die Schädigung des photosynthetischen Apparates reversibel oder irreversibel ist. Um diese Frage hinsichtlich der Einwirkung von HCl zu prüfen, wurden die mit HCl begasten Flechten nach Versuchsabschluß für 10 Tage der weitgehend HCl-freien Außenluft des Versuchsfeldes des Botanischen Institutes ausgesetzt.

Bei den Flechten, deren photosynthetische Leistungsfähigkeit durch HCl nicht abgefallen war, zeigen sich Schwankungen, die die bekannte Abhängigkeit der Photosynthese von den Außenfaktoren widerspiegeln. Von den Flechten, die eine starke Depression der Photosynthese unter dem Einfluß von HCl aufweisen, zeigen *P. saxatilis* und *P. furfuracea* eine erstaunlich hohe Regenerationsfähigkeit. *P. saxatilis* erreicht nach 10 begasungsfreien Tagen wieder 75 % und *P. furfuracea*, die

am stärksten geschädigt war, wieder 10 % der Photosyntheseleistung vor Versuchsbeginn (vergl. Tab 7). Lediglich *C. glauca* scheint irreversible Schädigungen des Assimilationsapparates aufzuweisen, da auch nach 10 tägiger Erholung keine O_2 -Entwicklung bei Belichtung mehr feststellbar ist.

Der Einfluß von HCl auf die Respiration der Flechten ist weniger eindeutig als auf die Photosynthese. *P. furfuracea*, eine Art, die bei HCl-Begasung eine starke Depression der Photosynthese zeigt, erfährt gleichzeitig eine Steigerung der Dunkelatmung (vergl. Tab 7). Die als empfindlich einzustufenden Flechten *P. saxatilis* und *C. glauca* weisen dagegen eine Depression der Respiration auf.

Nach 10 tägiger Erholung ist die Atmung von *P. saxatilis* wieder bis annähernd auf den Ausgangswert angestiegen, während bei *C. glauca*, vermutlich infolge irreversibler Schäden, die Werte der Dunkelatmung nicht wieder den zu Versuchsbeginn gemessenen Wert erreichen. Die Erforschung der Erholung nach HCl-Begasung müßte zum Gegenstand weiterer Untersuchungen gemacht werden.

Der unter Freilandbedingungen durchgeführte Versuch sollte Auskunft über die Wirkung fluoridhaltiger Immissionen auf die Flechten geben. Ähnlich wie bei den Schadgasen HCl und SO_2 scheint auch durch Fluor die Photosynthese am stärksten getroffen zu werden. Es zeigen sich bei den in geringerer Entfernung als 600 m vom Emittenten exponierten Flechten mit Ausnahme von *X. parietina* starke Depressionen der Photosynthese.

Legt man der Reihung nach der vorhandenen Schädigung die gleichen Empfindlichkeitsstufen zugrunde wie bei SO_2 und HCl,

so erwies sich für die an Station 1 (50 m) exponierten Flechten eine Abstufung, bei der *L. sulcata*, *C. glauca*, *H. physodes* und *L. furfuracea* als sehr empfindlich anzusehen sind (Tab.13). Demgegenüber erwiesen sich *C. glauca* gegen SO_2 und HCl als empfindlich bzw. *H. physodes* und *L. sulcata* gegen HCl sogar als weniger empfindlich.

Tab. 13: Rangfolge von Flechten nach ihrer Sensibilität nach 28 tägiger Exposition bei der Glashütte Limburg

Empfindlichkeitsstufen	äußerliche Schädigung	Chlorophyllgehalt	apparente Photosynthese
sehr empfindlich	<i>L.furfuracea</i>	<i>L.furfuracea</i> <i>C. glauca</i> <i>H. physodes</i> <i>L.sulcata</i>	<i>L.sulcata</i> <i>C. glauca</i> <i>H.physodes</i> <i>L.furfuracea</i>
empfindlich	<i>H.physodes</i> <i>L.sulcata</i> <i>C.glauca</i>	<i>L.saxatilis</i>	<i>L.saxatilis</i>
weniger empfindlich	<i>L.saxatilis</i> <i>X. parietina</i>	<i>X.parietina</i>	<i>X.parietina</i>

L. saxatilis läßt sich nach den Ergebnissen der Photosynthesemessungen gegenüber HF als empfindlich einstufen. Sie nimmt damit die gleiche Empfindlichkeitsstufe ein, die sie auch bei SO_2 und HCl innehat. *X.parietina*, die sich gegenüber SO_2 und HCl als weitgehend unempfindlich erwies, zeigt auch unter der Einwirkung von Fluorid keine Depression der Photosynthese.

Im vorliegenden Versuch kann in Übereinstimmung mit anderen Autoren (KUSH 1971, COHEN und LE BLANC 1972, LE BLANC, RAC und COHEN 1972) eine Zerstörung des Chlorophylls unter Ein-

wirkung fluoridhaltiger Emissionen festgestellt werden. Die nach den Ergebnissen der Chlorophyllgehaltsbestimmungen vorgenommene Sensibilitätsstufung stimmt mit derjenigen überein, die nach den Gaswechsellmessungen aufgestellt wurde.

Die Bonitierung der äußerlich sichtbaren Schädigung dagegen ergibt ähnlich wie bei HCl und SO₂, daß sich die assimilatorische Empfindlichkeit und die Reihung nach der Bonitierung nur teilweise zur Deckung bringen lassen. Nach der sichtbaren Schädigung rangiert nur *P. furfuracea* (100 % Schädigungsgrad) unter sehr empfindlich, während *H. physodes* (50-70 %), *P. sulcata* (50-70 %) und *C. glauca* (51-70 %) als empfindlich einzustufen sind. *P. saxatilis* (10 %) und *X. parietina* (0-10 %) erweisen sich als weniger empfindlich. Eine Übereinstimmung in der Schädigungsreihung für Photosynthese und Chlorophyllgehalt einerseits und Bonitierung andererseits ergibt sich also nur für *P. furfuracea* und *X. parietina*.

Eine Depression der Dunkelatmung kann selbst bei den durch Fluorid stark geschädigten Flechten nicht beobachtet werden.

Mit Ausnahme von *P. furfuracea* zeigen alle Flechten sogar mit zunehmender Annäherung an den Emittenten eine Stimulation der Respiration.

P. furfuracea kann mithin als geeignete Testflechte für die Fluorschadendiagnostik angesehen werden, da sie beide Forderungen für die Auswahl erfüllt, große Empfindlichkeit bei gleichzeitiger Übereinstimmung von Vitalitätsminderung und Farbveränderung.

Darüberhinaus weist diese Flechte gegenüber allen drei untersuchten Schadgasen eine große Empfindlichkeit auf, so daß

sie für die Feststellung von Grenzkonzentrationen mehrerer Schadgase einsetzbar ist.

Tab. 14: Wirkung von SO_2 , HCl und HF auf die Atmung von Flechten

es bedeuten: stimuliert : über 110 % des Ausgangswertes
 unverändert : 90 - 110 % " "
 Depression : unter 90 % " "

	SO_2 nach 28 Tagen	HCl nach 6 Tagen	HF nach 28 Tagen
stimuliert	P.sulcata H.physodes	H.physodes P.furfuracea	H.physodes C.glaucia X.parietina P.saxatilis
unverändert	X.parietina P.saxatilis	X.parietina P.sulcata	P.sulcata P.furfuracea
Depression	P.furfuracea C.glaucia P.caperata	C.glaucia P.saxatilis	

Chemische Analysen der exponierten Thalli bestätigen den von anderen Autoren (GILBERT 1971, NASH 1971, COMEAU und LE BLANC 1972, LE BLANC, RAO und COMEAU 1972) beschriebenen Anstieg des Fluoridgehaltes der Flechten unter dem Einfluß fluoridhaltiger Emissionen. Mit zunehmender Annäherung an den Emittenten konnte eine Zunahme der Fluoridkonzentration in den Thalli beobachtet werden.

Zwischen der Empfindlichkeit der Flechten gegen HF und der gemessenen Fluoridanreicherung in den Thalli scheint eine Beziehung zu bestehen. Die Flechten, die nach den Ergebnissen der Gaswechsellmessungen und der Chlorophyllgehaltsbestimmung als sehr empfindlich einzustufen sind, weisen auch den

stärksten Anstieg des Fluoridgehaltes auf. Gegenüber dem Ausgangswert ist der Fluoridgehalt von *P. furfuracea*, *H. physodes*, *C. glauca* und *P. sulcata* nach 28 tägiger Exposition am Standort I auf rund 600-700 % des Ausgangswertes angestiegen. *P. saxatilis*, die als empfindlich einzustufen ist, weist nach 28 Tagen einen Fluoridgehalt auf, der etwa das Vierfache des Ausgangswertes ausmacht. Die weniger empfindliche *X. parietina* dagegen zeigt nach Versuchsabschluß nur eine Verdreifachung ihres Fluoridgehaltes. Fluoridbestimmungen in exponierten Flechtenthalli erscheinen mithin neben der Bonitierung als geeignete Methode zum Nachweis von Fluoreinwirkungen.

Zum Abschluß ein Vergleich aller untersuchten Arten hinsichtlich ihrer Eignung als Testflechten:

P. furfuracea ist aus den oben genannten Gründen als Testflechte am geeignetsten. Die Verwendung von *X. parietina* als Bioindikator erscheint empfehlenswert, wenn sehr hohe Schadgaskonzentrationen zu erwarten sind, denn eine Schädigung dieser Flechte ergibt ein recht eindeutiges Indiz für eine sehr hohe Immissionsbelastung. Durch Kombination der beiden Arten ist die Möglichkeit für semi-quantitative Aussagen gegeben. Die anderen untersuchten Arten sind weniger geeignet, weil sie einen unterschiedlichen Rang bei äußerlicher Schädigung und physiologischen Schädigungen aufweisen und gegenüber der Einwirkung von verschiedenen Schadgasen unterschiedlich empfindlich sind.

Es war bereits die Frage gestellt worden, welche Bedeutung den beiden im Flechtenthallus vereinigten Partnern für den Grad der Schädigung unter dem Einfluß von Immissionsgasen

zukommt. Geht man von der immer wieder beobachteten Depression der Photosynthese aus, die sich ja unter den hier ausgesuchten Kriterien als besonders auffällig erwies, so muß den Rhycobionten die entscheidendere Rolle zugesprochen werden. So wurde deshalb versucht, durch Anfertigung von Querschnitten die Zahl der Algen pro Flächeneinheit in den Thalli zu ermitteln. Aus Tabelle 15 ergibt sich, daß den größten Algenreichtum im Thallus *X. parietina* aufweist; im großen Abstand liegt dann aber in der Reihung *P. furfuracea* an zweiter Stelle, und bei weiter abfallenden Algenzahlen endet die Reihung mit *P. caperata*.

Tab. 15: Algenzahlen von 7 verschiedenen Flechtenarten /mm Schichtdicke

Art	Algenzahl/mm Schichtdicke	Chlorophyllgehalt Ausgangswert		
		SO ₂	HCl	HF
<i>X. parietina</i>	9120	1,95	1,34	1,91
<i>P. furfuracea</i>	2910	1,10	0,93	0,93
<i>P. sulcata</i>	2290	2,08	1,07	1,56
<i>P. saxatilis</i>	1860	1,89	0,66	0,53
<i>C. glauca</i>	1560	1,18	1,10	1,65
<i>H. physodes</i>	1450	0,94	0,87	0,87
<i>P. caperata</i>	880	0,65		

Diese Befunde sind insofern unerwartet, als hinsichtlich der Algenzahl die beiden Flechten, die sich in den Versuchen am weitesten entfernt in Bezug auf ihre Resistenz erwiesen, unmittelbar aufeinander folgen. Man hätte vielmehr vermutet, daß *X. parietina* und *P. furfuracea* bei einer Bewertung der Algenzahl ebenfalls als Gegenpole auftreten würden. Diese offensichtliche Diskrepanz ist vielleicht darauf zu-

rückzuführen, daß für den Algenreichtum (und damit für die Chlorophyllmenge) in einem bestimmten Thallus die jeweiligen Lichtverhältnisse am natürlichen Standort eine entscheidende Rolle spielen. Es wäre möglich, daß Flechten an einem Waldrand eine andere Relation zwischen Alge und Pilz aufweisen als die gleiche Art inmitten eines Waldbestandes. Da nun die angefertigten Flechtenpräparate zur Auszählung der Alge nicht unbedingt von genau dem gleichen Mikrostandort stammen wie die Flechten, die für die ökophysiologischen Versuche verwendet wurden, lassen sich die aufgeführten Unstimmigkeiten eventuell hierauf zurückführen.

Dennoch dürfte für die Toxitoleranz der Flechten außer den Rhycobionten (in den 7 untersuchten Flechten kommt gleichermaßen die Alge *Trebouxia* vor) auch der Mycobiont von Bedeutung sein.

1. In Begasungsexperimenten und im Freilandversuch wurden 7 Flechtenarten auf ihre Empfindlichkeit gegenüber SO_2 , HCl und HF untersucht. Neben der Feststellung der äußerlich sichtbaren Schädigung interessierte besonders die Wirkung auf den Gasstoffwechsel und den Chlorophyllgehalt der Flechten.
- 2 a. Nach der äußerlich sichtbaren Schädigung rangieren *P. caperata* und *P. furfuracea* unter sehr empfindlich, *H. physodes*, *C. glauca* und *P. sulcata* unter empfindlich und *P. saxatilis* und *X. parietina* unter weniger empfindlich gegenüber SO_2 .
- b. Nach 28 Tagen SO_2 -Begasung ergibt sich nach dem Chlorophyllabbau folgende Rangfolge:
C. glauca, *P. furfuracea* und *P. caperata* sehr empfindlich
P. saxatilis, *P. sulcata* und *H. physodes* empfindlich
X. parietina weniger empfindlich
- c. Die Respiration wies unter dem Einfluß von SO_2 nur bei *C. glauca* und *P. caperata* eine Depression auf.
- d. wird als Kriterium für die Empfindlichkeit gegen SO_2 der Zeitpunkt gewählt, zu dem der CO_2 -kompensationspunkt unterschritten wird, so ergibt sich folgende Reihenfolge abnehmender Empfindlichkeit:
P. caperata, *C. glauca*, *H. physodes*, *P. furfuracea*, *P. saxatilis*, *P. sulcata*, *X. parietina*.
- e. Bei Empfindlichkeitsstufung nach 28 tägiger Begasung erweisen sich hinsichtlich der Photosynthese *P. furfuracea* als sehr empfindlich, ebenso *H. physodes*; *C. glauca*, *P. caperata*, *P. sulcata* und *P. saxatilis* als empfindlich und *X. parietina* als weniger empfindlich.
- f. Der Gehalt an Gesamtschwefel erfuhr bei SO_2 -Begasung keine eindeutigen Veränderungen. Der Gehalt an organisch gebundenem Schwefel nahm dagegen bei allen Flechtenarten außer *C. glauca* zu.
- 3 a. Nach 6 tägiger HCl -Einwirkung ergab die Bonitierung bei keiner der 6 Flechtenarten eine deutliche äußerliche Schädigung.

- b. Ein Chlorophyllabbau setzte in stärkerem Maße nur bei *P. saxatilis* ein.
 - c. Ein eindeutiger Einfluß von HCl auf die Respiration der Flechten war nicht gegeben.
 - d. Für die apparente Photosynthese ergab sich bei Degasung mit HCl folgende Sensibilitätsrangfolge:
P. furfuracea sehr empfindlich, *C. glauca* und *P. saxatilis* empfindlich, *H. physodes*, *P. sulcata* und *X. parietina* weniger empfindlich.
 - e. Nach 10 tägiger Erholung zeigten *P. saxatilis* und *P. furfuracea* durch ein erneutes Ansteigen der Photosyntheseraten eine deutliche Regenerationsfähigkeit. *C. glauca* dagegen scheint irreversibel geschädigt zu sein.
- 4 a. Die Bonitierung der sichtbaren Schädigung durch HF-Einwirkung ergab folgende Reihenfolge:
P. furfuracea sehr empfindlich, *H. physodes*, *P. sulcata* und *C. glauca* empfindlich, *P. saxatilis* und *X. parietina* weniger empfindlich.
- b. Bei der Einstufung der Empfindlichkeit nach dem Chlorophyllabbau ergab sich folgende Reihenfolge:
P. furfuracea, *C. glauca*, *H. physodes* und *P. sulcata* sehr empfindlich, *P. saxatilis* empfindlich und *X. parietina* weniger empfindlich.
- c. Die Respiration der Flechten erfuhr unter dem Einfluß von HF eine leichte Stimulation.
- d. Bei einer 28 tägigen Exponierung unter HF-Einfluß ergaben sich für die Photosynthese der Flechten die gleichen Empfindlichkeitsstufungen wie beim Chlorophyllgehalt.
- e. Zwischen Empfindlichkeit und Fluoridanreicherung der Thalli scheint eine Beziehung zu bestehen. Die am empfindlichsten reagierenden Flechten wiesen die stärksten Fluoridanreicherungen auf.
5. *P. furfuracea* erwies sich gegen alle Gase gleichermaßen als sehr empfindlich und ließ diese Einstufung sowohl nach der äußeren Schädigung als auch nach der Schädigung des photosynthetischen Apparates zu. *X. parietina* erwies sich gegen alle 3 Schadgase als weniger empfindlich. Bei den

übrigen Flechtenarten war die Empfindlichkeit gegenüber den verschiedenen Schadgasen unterschiedlich. Darüberhinaus bestand nicht immer eine Parallelität zwischen Farbveränderung und Vitalitätsminderung.

- BADDLERLEY, M.S.,
FERRY, B.W. und E.J.
FINEGAN
-, -, -,
BARKMAN, J.J.
BERGE, H.
BERGE, H. und H.
DAHMEN
BERTSCH, K.
-, -.
-, -.
BRETTSCHEIDER, H.
BESCHEL, R.
BLISS, L.O. und L.
B. HADLEY
BORTENSCHLAGER, S.
-, -.
BÖRTITZ, S. und H.
RANFT
- 1971: A New Method of Measuring Lichen Respiration.
Lichenologist 2, 18-25
1972: The effects of Sulphur Dioxide on Lichen Respiration.
Lichenologist 2, 283-291
1968: The influence of air pollution on bryophytes and lichens.
Air pollution, 197-209, wagenin-
gen
1970: Handbuch der Pflanzenkrankheiten, Band I. 7. Aufl., 4. Lief.
Verlag Paul Parey, Berlin
1959: Die Anwendungsmöglichkeiten der chem. Luft- und Pflanzenanalyse zur Beurteilung industrieller Immissionen.
Köln und Opladen
1964: Flechtenflora von Südwestdeutschland.
Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
1966: Über den CO₂-Gaswechsel einiger Flechten nach Wasseraufnahme.
Planta 68, 157-166
1966: CO₂-Gaswechsel und Wasserhaushalt der aerophilen Grünalge Apatococcus labatus.
Planta 70, 46-72
1972: Die Wirkung von Chlorwasserstoff auf verschiedene Flechtenarten.
Staatsexamensarbeit, Gießen 72
1958: Flechtenvereine der Städte, Stadtflechten und ihr Wachstum.
Ber. d. naturwiss. med. Vereins Innsbruck 52, 53, 7-158, 1957-63
1964: Photosynthesis and respiration of alpine lichens.
Am. J. Bot. 51, 870-874
1963: Luftverunreinigung und Flechtenverbreitung in Linz.
Ber. naturwiss. med. Ver. Innsbruck 53, 23-27
1969: Flechtenverbreitung und Luftverunreinigung in Wels.
Naturkundl. Jb. Stadt Linz, 207-212
1972: Zur SO₂ und HF-Empfindlichkeit von Flechten und Moosen.
Biol. Zbl. 91, 613-623

- BRIGHTMAN, F.H. 1959: Some factors influencing lichen growth in towns.
Lichenologist 1 (3), 104-108
- BRODO, I.M. 1961: Transplant experiments with corticolous lichens—a new technique.
Ecology 42, 838-841
- BUCK, M. 1962: Geeignete Methoden zur Bestimmung des Gesamtschwefelgehaltes pflanzlicher Substanz.
Landw.Forschung 15, 135-145
- BUTIN, H. 1954: Physiologisch-ökologische Untersuchungen über den Wasserhaushalt bei Flechten.
Biol.Zentralblatt 73, 459-502
- BÜTTNER, R. 1971: Untersuchungen zu Ökologie und Physiologie des Gasaustauschs bei einigen Strauchflechten.
Flora B 160, 72-99
- COKER, P.D. 1967: The effects of sulphur dioxide pollution on bark epiphytes.
Trans.Brit.Bryol.Soc. 5, 341-347
- GREED, E.R. und D.R. LEES 1973: Biological method of estimating smoke and sulphur dioxide pollution.
Nature 244, 278-280
- DÄSSLER, H.G. 1962: Die Einwirkung von Schwefeldioxid auf verschiedene Pflanzeninhaltsstoffe.
Wiss.Z.Techn.Univ.Dresden 11, 567-569
- , — und H. RANFT 1969: Das Verhalten von Flechten und Moosen unter dem Einfluß einer SO₂-Begasung.
Flora B 158, 454-461
- , —, RANFT, H. und K.H. REHN 1972: Zur Widerstandsfähigkeit von Gehölzen gegenüber Fluorverbindungen und Schwefeldioxid.
Flora 161, 289-302
- ELLENBERG, H. 1972: Belastung und Belastbarkeit von Ökosystemen.
Tagungsber.Ges.f.Ökologie, Gießen 1972, 19-26
- ENSGARBER, A. 1954: Über den Einfluß der Austrocknung auf die Assimilation und Atmung von Moosen und Flechten.
Flora 141, 432-475
- COMBET, G. und F. LE BLANC 1977: Influence du fluor sur le *Funaria hygrometrica* et l'*Hypogymnia physodes*.
Can.J.Bot. 55, 847-856

- ERTL, L. 1951: Über die Lichtverhältnisse in Laubflechten. *Planta* 39, 245-270
- FENTON, A.F. 1960: Lichens as indicators of atmospheric pollution. *Irish Naturalists J.* 13, 153-159
- FOLLMANN, G. 1967: Fördern Salzkrusten die Wasseraufnahme von Krustenflechten? *Umschau in Wiss.u.Techn.* 13, 420-421
- GARBER, K. 1960: Erfahrungen mit der Blattanalyse bei Rauchscha denuntersuchungen. *Angew.Bot.* 34, 33-37
- , -. 1967: Luftverunreinigung und ihre Wirkungen. Gebrüder Bornträger Verlag, Berlin-Nikolassee
- , -. 1973: Luftverunreinigung, eine Literaturübersicht. *Ber.Eidg.Anst.forstl.Vers.wesen*, Birmensdorf, Nr.102
- GERLACH, D. 1969: Botanische Mikrotechnik. Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- GILBERT, O.L. 1965: Lichens as indicators of air pollution in the Tyne Valley. *Ecology and Industrial Society*, Oxford, 35-47
- , -. 1968: Biological indicators of air pollution. Ph.D.thesis, University of Newcastle upon Tyne
- , -. 1969: The effects of SO₂ on lichens and bryophytes around Newcastle upon Tyne. *Air pollution. Proc. European Congr. on the influence of air pollution on plants and animals*, Wageningen, 223-235
- , -. 1970a: Further studies on the effect of sulphurdioxide on lichens and bryophytes. *New Phytologis t* 69, 605-627
- , -. 1970b: A biological scale for the estimation of sulphur dioxide pollution. *New Phytol.* 69, 629-634

- GILLMAN, C.L. 1971c: The effect of air borne fluo-
rides on lichens.
Lichenologist 5, 26-32
- , -. 1971: Studies along the edge of an
lichen desert.
Lichenologist 5, 11-17
- GOEBEL, K. 1926: Die Wasseraufnahme der Flechten.
Ber.d.dt.Bot.Ges. 44, 158-161
- GUDERTIAN, R. 1970: Untersuchungen über quantita-
tive Beziehungen zwischen dem
S-Gehalt von Pflanzen und dem
SO₂-Gehalt der Luft.
Z.f.Pflanzenkrankheiten und
Pflanzenschutz 77, 201-399
- , -. und H.van HAUT 1970: Nachweis von SO₂-Wirkungen an
Pflanzen.
Staub 30, 17-26
- , -, -, -. und
H.STRATMANN 1960: Probleme der Erfassung und
Beurteilung von Wirkungen gas-
förmiger Luftverunreinigungen
auf die Vegetation.
Z.Pflanzenkrankh. 67, 257-264
- HAWKSWORTH, D.L. 1970: Qualitative scale for estima-
ting sulphur dioxide air pollu-
tion in England and Wales
using epiphytic lichens.
Nature 227, 145-148
- , -. 1971: Lichens as litmus for air pol-
lution. A historical review.
Intern.J.Envir.Studies 1, 281
- HEATWOLE, H. 1966: Moisture exchange between the
atmosphere and some lichens
of the genus cladonia.
Mycologica 58, 148-156
- HILL, D.J. 1971: Experimental study of the effect
of sulphite on lichens with
reference to atmospheric pollu-
tion.
New Phytol. 70, 831-836
- , -. und H.W.
WOOLHOUSE 1966: Aspects of the autecology of
Xanthoria parietina.
Lichenologist 3, 207
- HÜLSENBERG, C. 1972: Wirkung von Luftfremdstoffen
auf Kulturpflanzen.
Schr.Reihe Ver.Wass.-Boden-
Lufthyg., Berlin-Dahlem 38,
281-284
- JÄGER, H.J. und L.
STEUBING 1970: Fraktionierte Schwefelbestim-
mung in Pflanzenmaterial zur
Beurteilung einer SO₂-Einwir-
kung.
Angew.Bot. 64 209-221

- JUMELLE, H. 1892: Recherches physiologiques sur les lichens.
Rev.gen.Bot. 4, 49-64, 103-121, 159-175, 220-231, 259-272, 305-320. Zit. bei QUISREL, 1960
- JÜRGING, P. 1972: Flechten - Bioindikatoren der Luftverunreinigung?
Tag.Ber. Ges.f.Ökologie, Gießen, 141-145
- KÄMPFER, M. 1971: Flechten als Zeigerpflanzen für Luftverunreinigungen und für besondere Klimabedingungen.
(Stadtklima), 2.erw.Aufl.Bibl. Nr. 3, Bonn-Bad Godesberg, BAV IVL
- KERSHAW, K.A. 1972: The relationship between moisture content and net assimilation rate of lichen thalli and its ecological significance.
Can.J.of Bot. 50 No.3, 543-555
- KISSER, J. 1967: Praktische und experimentelle Erfahrungen über die Fluor-Resistenz von Holzgewächsen.
Vortr.Arbeitstagung "Fluor-Wirkung", Düsseldorf 1964. Aus GARBER, 1967
- KLEE, R. 1969: Die Wirkung von gas- und staubförmigen Immissionen auf Respiration und Inhaltsstoffe von Parmelia physodes.
Dissertation, Giessen
- , -. 1969: Die Wirkung von gas- und staubförmigen Immissionen auf Respiration und Inhaltsstoffe von Parmelia physodes.
Angew.Bot. 64, 253-261
- , -. und A. WARNS 1971: Aussagewert von Flechtenexplantaten für eine Immissionsbelastung.
Ber.Dtsch.Bot.Ges. 84, 515-522
- KLEINZELLER, A. und Mitarbeiter 1965: Manometrische Methoden und ihre Anwendung in Biologie und Biochemie.
Gustav Fischer Verlag, Jena
- KIRSCHBAUM, U. 1973: Auswirkungen eines industriell-urbanen Ballungsraumes auf die epiphytische Flechtenvegetation in der Region Untermain.
Dissertation Giessen 1973, Fachber.Biol.15

- HIRSCHMANN, G. 1972: Flechtenkartierungen in der Region Untermain zur Erfassung von Immissionsbelastungen. Tagungsber. Ges.f.Ökologie, Gießen 1972
- , -, R. ALLE und L. STEUBING 1971: Flechten als Indikatoren für die Immissionsbelastung im Stadtgebiet von Frankfurt. Staub-Reinhaltung der Luft 31, 21-24
- KOLMBE, E. 1927: Untersuchungen über die Wasserdampfaufnahme der Flechten. Planta 3, 734-757
- KUNZE, M. 1972: Emittentenbezogene Flechtenkartierung auf Grund von Frequenzuntersuchungen. Öecologia (Berl.) 9, 123-133
- LAMPADIUS, F. 1960: Beiträge zur Fluorschadendiagnostik, II. Ermittlung fluorhaltiger Immissionen durch Nachweis der Speicherung von Fluor in der Baumrinde. Phytopath.Z. 38, 384-393
- LANGE, O.L. 1953: Versuche zur Hitze- und Trockenresistenz der Flechten. Flora 140, 39-97
- , -. 1962: Die Photosynthese der Flechten bei tiefen Temperaturen und nach Frostperioden. Ber.dtsch.Bot.Ges. 75, 351-352
- , -. 1965a: Der CO₂-Gaswechsel von Flechten bei tiefen Temperaturen. Planta 64, 1-19
- , -. 1965b: Der CO₂-Gaswechsel von Flechten nach Erwärmung in feuchtem Zustand. Der.dtsch.Bot.Ges. 78, 441-454
- , -. 1966: CO₂-Gaswechsel der Flechte Cladonia alicornis nach langfristigen Aufenthalt bei tiefen Temperaturen. Flora B 156, 500 - 502
- , -. 1969: Experimentell-ökologische Untersuchungen an Flechten der Negev-Wüste I. CO₂-Gaswechsel von Ramalina maciformis (Del.) Bary unter kontrollierten Bedingungen im Laboratorium. Flora B 158, 324-359
- , -. 1970: Experimentell-ökologische Untersuchungen an Flechten der Negev-Wüste III. CO₂-Gaswechsel

- sel und Wasserhaushalt von Krusten- und Blattflechten am natürlichen Standort während der sommerlichen Trockenperiode.
Flora B 159, 525-533
- LANGE, O.L. und A. BERTSCH 1965: Photosynthese von *Ramalina maciformis* nach Wasserdampfaufnahme aus dem Luftraum.
Naturw. 52, 215-216
- , - und H. METZNER 1965: Lichtabhängiger Kohlenstoffeinbau in Flechten bei tiefen Temperaturen.
Naturw. 52, 191
- , -, SCHULZE, E.D. und W. KOCH 1968: Photosynthese von Wüstenflechten am natürlichen Standort nach Wasserdampfaufnahme aus dem Luftraum.
Naturw. 55, 658-659
- , -, -, - und - 1970: Experimentell-ökologische Untersuchungen an Flechten der Negev-Wüste II. CO₂-Gaswechsel und H₂O-Haushalt von *Ramalina maciformis* (Del.) Bory am natürlichen Standort während der sommerlichen Trockenperiode.
Flora B 159, 38-62
- LE BLANC, F. 1961: Influence de l'atmosphère polluée des grandes agglomérations urbaines sur les Epiphytes corticoles.
Rev. Canad. Biol. 20, 823-827
- -, - und J. DE SLOOVER 1970: Relation between industrialization and the distribution of epiphytic lichens and mosses in Montreal.
Can. J. Bot. 48, 1485-1496
- -, -, COMEAU, G. und D. N. RAO 1971: Fluoride injury symptoms in epiphytic lichens and mosses.
Can. J. Bot. 49, 1691-1698
- -, -, RAO, D. N. und G. COMEAU 1972a: The epiphytic vegetation of *populus balsamifera* and its significance as an air pollution indicator in Sudbury, Ontario.
Can. J. Bot. 50, 519-528
- -, -, DHURVA, F. und G. COMEAU 1972: Indices of atmospheric purity and fluoride pollution pattern in Arvida, Quebec.
Can. J. Bot. 50, 991-998
- -, - und D. RAO 1973: Evaluation of the pollution and drought hypotheses in urban environments.
The Bryologist 76, 1-15

- ROBERTS, L. and
D. H. RICHARDSON
- MÜLLER, J.
- NASH, T. H.
- PARKSON, L. und
E. SKYE
- ROELT, J.
- ROCKETT, K. J., E. NIE-
BOER, FLORA, W. P. und D. H.
S. RICHARDSON
- RYATT, F. B.
- QUISPEL, A.
- RAO, D. N. und F.
LE BLANC
- REUSMANN, G. und J.
WESTPHALEN
- RIED, A.
- , -.
- 1957: Effects of atmospheric fluo-
ride on the respiration rate
of bush beans and gladiolus
leaves.
Plant Physiol. 32, 121-124
- 1957: Spezifischer Nachweis von SO₂-
Rauchschäden an Pflanzen mit
Hilfe von Blattpigmentanalysen.
Naturw. 44, 453
- 1971: Lichen sensitivity to hydrogen
fluoride.
Bull. of the Torrey Bot. Club 98,
103-106
- 1965: Air pollution affects pattern
of photosynthesis in *Parmelia*
sulcata, a corticolous lichen.
Science 148, 1600-1602
- 1969: Bestimmungsschlüssel europä-
ischer Flechten.
Verlag J. Cramer, 1969
- 1973: Sulphur dioxide: its effects
on photosynthetic ¹⁴C fixation
in lichens and suggested me-
chanisms of phytotoxicity.
New Phytol. 72, 141-154
- 1970: Lichens as indicators of air
pollution in a steel producing
town in South Wales.
Env. Pollution 1, 45-56
- 1960: Respiration of lichens.
In: Handb. d. Pflanzenphysiologie
XII/2, Springer Verlag Berlin,
Göttingen, Heidelberg 1960,
455-460
- 1965: Effects of sulphur dioxide on
the lichen alga, with special
reference to chlorophyll.
Bryol. 69, 69-75
- 1969: Ein elektrometrisches Verfah-
ren zur Bestimmung des Fluor-
gehaltes in Pflanzenmaterial.
Staub-Reinhaltung Luft 29,
413-415
- 1953b: Photosynthese und Atmung bei
xerostabilen und xerolabilen
Krustenflechten in der Nach-
wirkung von vorausgegangener
Entquellung.
Flanta 41, 436-438
- 1960a: Stoffwechsel und Verbreitung
von Flechten I. Flechtenzonierun-
gen an Bachufern u. ihre Bezie-
hungen z. jährl. Überflutungs-

- RIED, ... 1960b: Zellulosebau und Assimilationshaushalt von Laub- und Krustenflechten. Biol.Zentralbl. 79, 129-132
- , -. 1960c: Nachwirkungen der Entquellung auf den Gaswechsel von Krustenflechten. Biol.Zentralbl. 79, 657-678
- , -. 1960d: Stoffwechsel und Verbreitung von Flechten II. Wasser- und Assimilationshaushalt, Entquellungs- und Submersionsresistenz von Krustenflechten benachbarter Standorte. Flora 149, 345-385
- RIEDEL, R. 1972: Generelle Eigenschaften der Biosphäre. Tag.ber.Ges.f.Okologie, Gießen 1972, 17
- RYDZAK, J. 1956: Influence of small towns on the lichen vegetation VII. Discussion and general conclusions. Ann.Univ.Mar.Curie-Sklod., Sect. C 11, 25-50
- SAUNDERS, I. J. W. 1970: Air pollution in relation to lichens and fungi. Lichenologist 4, 337-348
- , -, -, -. 1971: Air pollution and lichens. In: Ecology of leaf surface microorganisms (Ed by C.H. Dickinson) Proc.intern.Symp.Lewcastle, U.K. Academic Press, London 1971
- SCHMITZ-DIETRICH, W. 1896: Versuche über die Einwirkung von Fluorwasserstoff in der Atmosphäre auf Pflanzen. Tharandter Forstl.Jahrb. 46, 50-57
- SCHONBLECK, H. 1968: Einfluß von Luftverunreinigung (SO_2) auf transplantierte Flechten. Naturw. 55, 451-452
- , -. 1969: Eine Methode zur Erfassung der biologischen Wirkung von Luftverunreinigung durch transplantierte Flechten. Staub- und Aerosolmessungen der Luft 2, 14-18

- SCHNEIDER, H. 1972: Untersuchungen in Nordrhein-westfalen über Flechten als Indikatoren für Luftverunreinigungen. Schriftenr.d.Landesanst.f. Immissions- und Bodenschutz des Landes NRW 26, 99-104
- , -, BUCK, H., VAL HAUPT, H. und GIESCHOLL 1970: Biologische Meßverfahren für Luftverunreinigung. VDI-Berichte 149, 225-234
- SCHNEIDER, H. 1970: Experimente zur Pflanzenökologie. Verlag Rombach, Freiburg
- SCHUBERT, R. und W. FRITSCH 1965: Beitrag zur Einwirkung von Luftverunreinigungen auf xerische Flechten. Arch.Natursch.u.Landsch.forsch. 5, 107-111
- SCHULZE, E.D. und C.L. LANGE 1968: CO₂-Gaswechsel der Flechte H. physodes bei tiefen Temperaturen im Freiland. Flora B 158, 180-184
- SCHWARBE, G.H. 1970: Was ist die Umwelt des Menschen? Dr.W. Junk N.V.-Publishers - The Hague, 1-12
- SEITZ, W. 1972: Flechtenwuchs und Luftverunreinigung im Großraum von Saarbrücken. Ber.Dtsch.Bot.Ges. 85, 239-247
- SERVAZ, R. 1926: Parmelia tiliacea, ein kustlav och marin islandsrelikt i Skandinavien. Svensk Bot.Tidskr. 52, 133-190 zit. bei LE BLANC und RAO 1973
- SHOMMAK, R.E. 1971: Effects of sulphur dioxide on net photosyntheses and chlorophyllcontent in lichen thalli and cultured lichen symbionts. Diss.Ohio State Univ., 1971
- , -, - 1972: Residual effects of sulphur dioxide on the net photosynthetic and respiratory rates of lichen thalli and cultured lichen symbionts. Bryologist 75, 335-341
- , -, - und E.D. RUDOLPH 1972: Water relations in living, dead and cellulose models of the lichen Umbilicaria papulosa. The Bryologist 74, 444-450

- STALFELT, H.G. 1939: Der Gasaustausch der Flechten.
Planta 29, 14-31
- , -, -. 1960: Flechten und Moose.
In: Handbuch der Pflanzenphysiologie V/2.
Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 364-375
- SMITH, D.C. 1962: The biology of lichen thalli.
Biol. Rev. 37, 537-570
- SMITH, D.C. und S. MOLESWORTH 1973: Lichen physiology.
XIII. Effects of rewetting dry lichens.
New Phytol. 72, 525-533
- SMYTH, R. 1934: A contribution to the physiology and ecology of *Peltigera canina* and *P. polydactyla*.
Ann. Bot. 48, 782-818
- STEINER, M. 1957: Rindenepiphyten als Indikatoren des Stadtklimas.
Medizin und Städtebau 2, 119-124
- , -. 1965: Wachstum und Entwicklungsphysiologie der Flechten.
In: Handbuch der Pflanzenphysiologie XV/1.
Springer Verlag, Berlin, 758-801
- STEBING, L. 1965: Pflanzenökologisches Praktikum.
Verlag Paul Parey, Berlin
- , -. 1967: Grundlagen und neue Entwicklungstendenzen der Pflanzenökologie.
Biol. Rundsch. 5, 193-203
- , -. 1973: Forschung und Information.
Schriftenr. d. Rias-Funkuniv., Herausg. R. Kurzrock.
Probleme der Umweltforschung.
Colloquium Verlag, Berlin, 9-17
- , -. 1973: Immissionskataster als Bestandteil des Landschaftskatasters.
Natur und Landschaft 48, 39-43
- , -, KUNZE, C. und J. JÄGER 1972: Belastung und Belastbarkeit von Ökosystemen.
Tagungsbericht der Gesellschaft für Ökologie. Tagung Gießen 1972
Herausgegeben i. Auftr. der Ges. für Ökologie
- , -, KLEE, R. und KIRSCHBAUM, U. 1974: Flechten als Bioindikatoren in der Region Untermain.
Unveröff.

- STEBLING, I. und C. KUNZE 1972: Pflanzenökologische Experimente zur Umweltverschmutzung. Biologische Arbeitsbücher 11, Quelle und Meyer Verlag, Heidelberg
- STOCKER, O. 1927: Physiologische und ökologische Untersuchungen an Laub- und Strauchflechten. Flora 21, 334-415
- , -. 1956: Wasseraufnahme und Wasserspeicherung bei Thallophyten. In: Handbuch der Pflanzenphysiol. III. Springer Verlag, Berlin, 160-172
- TSCHÄPE, M. 1970: Untersuchungen über den Einfluß der Temperatur während der Dunkelperiode auf die Photosynthese und Gaswechsel in der nachfolgenden Lichtperiode. Flora B 159, 429-434
- URBACH, W., RUFF, W. und H. STRUM 1972: Experimente zur Stoffwechselphysiologie der Pflanzen. Bot. Inst. I der Univ. Würzburg
- UMBREIT, W. W., BURRIS, J. F. und J. F. STAUFFER 1957: Manometric techniques. 3. Aufl., Minneapolis
- VAN HAUT, H. 1961: Die Analyse von Schefeldioxidwirkungen auf Pflanzen. Staub 21, 52-56
- VERSEGHY, K. 1971: Angaben über den Wasserhaushalt einiger Xerotherm-Erdflechten. Ann. hist. nat. Mus. Nat. Hung 63, 83-97
- , -. 1972: Saisonale Veränderung des Chlorophyllgehaltes einiger xerothermen Flechtenarten. Bot. Közlem 59, 109-117
- VILLWOCK, J. 1959: Ökologisch-physiologische Untersuchungen zur Frage von Großstadteinflüssen auf die Verbreitung epiphytischer Flechten. Dissertation, Hamburg
- WILHELMSEN, J. B. 1959: Chlorophyll in the lichen *Peltigera*, *Parmelia* und *Xanthoria*. Bot. Tidskr. 55, 30-36
- WÜST, E. und K. F. GILY 1972: Umweltforschung, Umweltschutz, eine Auswahlbibliographie. Inst. f. Natursch., Darmstadt, Beiheft 24, 114-119 und 126-135

Meiner hochverehrten Lehrerin, Frau Professor Dr. J. Steubing möchte ich herzlich danken für die Überlassung des Themas, die großzügige finanzielle Förderung und das den Untersuchungen entgegengebrachte Interesse.

Mein herzlicher Dank gilt auch Herrn Professor Dr. R. Klee für seine ständige Hilfsbereitschaft, die wertvollen Hinweise für die Durchführung der Arbeit und für das Korrekturlesen der Arbeit.

Zu danken habe ich ferner Herrn Dr. U. Kirschbaum für die Unterstützung bei der Sammlung des Flechtenmaterials.

Weiterhin danke ich Herrn Dr. C. Hülsenberg für die Bereitstellung der Apparatur zur HCl -Begasung im Versuchsfeld Hattersheim.

Nicht zuletzt gilt mein Dank Herrn Dr. H. Berge und seinen Mitarbeitern für die Überlassung der Geräte zur Fluoridbestimmung.

Zum Schluß danke ich allen Damen und Herren des Botanischen Institutes für ihre Hilfsbereitschaft bei der Durchführung der Arbeit.

Lebenslauf

Am 17.9.1940 wurde ich, Gholamreza Arzani, als fünftes Kind des Kaufmannes Mohammad Arzani und seiner Ehefrau Kassumeh Arzani, geb. Arzani, in Teheran geboren.

Von 1947-1953 besuchte ich die Volksschule in Teheran, von 1953-1960 das Gymnasium in Teheran und bestand 1960 das Abitur.

In den Jahren 1960-1964 war ich als Mitarbeiter eines Rechtsanwaltes in Teheran tätig.

Seit Oktober 1964 halte ich mich in der BRD auf.

Von Dezember 1964 - August 1966 war ich als Praktikant bei der Firma BBC beschäftigt.

Im Wintersemester 1966/67 besuchte ich das schulgebundene Praktikum der Staatlichen Ingenieurschule Gießen.

Vom SS 1967 - SS 1968 absolvierte ich das Studienkolleg für Ausländische Studierende in Darmstadt.

Vom SS 1968 - SS 1972 war ich an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Justus Liebig-Universität immatrikuliert und bestand im April 1972 die Diplomhauptprüfung.

Seit Mai 1972 bin ich als Doktorand bei Frau Professor Dr. L. Steubing am Botanischen Institut II der Justus Liebig-Universität Gießen mit der Anfertigung meiner Doktorarbeit beschäftigt.

